

**Mapeamento das Áreas de Perigo de Inundação no Braço do
Baú, Ilhota - SC**

Leonardo Romero Monteiro

Orientador: Prof. Dr. Masato Kobiyama

2011/2



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL**

Leonardo Romero Monteiro

**MAPEAMENTO DAS ÁREAS DE PERIGO DE INUNDAÇÃO NO
BRAÇO DO BAÚ, ILHOTA - SC**

Trabalho apresentado à Universidade
Federal de Santa Catarina para
Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Masato
Kobiyama

Florianópolis

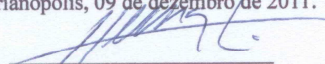
2011

Leonardo Romero Monteiro

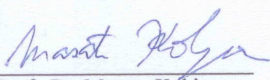
**MAPEAMENTO DAS ÁREAS DE PERIGO DE INUNDAÇÃO NO
BRAÇO DO BAÚ, ILHOTA - SC**

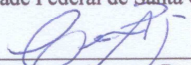
Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos
requisitos para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental – TCC II.

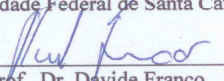
Florianópolis, 09 de dezembro de 2011.


Prof., Dr. Henrique de Melo Lisboa
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:


Prof., Dr. Masato Kobiyama
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof., Dr. Cesar Augusto Pompêo,
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof., Dr. Davide Franco,
Universidade Federal de Santa Catarina

Trabalho dedicado ao meu falecido avô, Arnaldo Cardoso, amante da ciência e natureza. Principal influenciador da minha carreira acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Masato, pela paciência, tempo dedicado e diversas discussões que auxiliaram na minha formação.

Aos colegas/amigos do LabHidro e graduação que nos momentos de dúvida e dificuldade estavam sempre dispostos a me ajudar.

À família pelo carinho e apoio de sempre, que me criaram da melhor maneira possível.

Aos amigos, que mesmo não estando diariamente presentes, sempre me deram forças para continuar lutando.

Aos professores que se empenham no ensinamento dos seus conhecimentos da melhor maneira possível, mesmo com obstáculos.

À FAPEU, pelo apoio financeiro.

Se não gerenciar a água, não vai conseguir governar o país.

(Provérbio Chinês)

RESUMO

Desde os tempos de colonização o estado de Santa Catarina já convive com desastres naturais, principalmente as inundações. Independente das medidas a serem adotadas na prevenção de desastres naturais, a primeira etapa consiste na identificação do perigo e em seguida do risco da ocorrência. O presente trabalho mapeou as áreas de perigo de inundações para a Bacia do Braço do Baú, localizada no município de Ilhota/SC. Para isso foram realizadas investigações hidrológicas da bacia, assim como a modelagem hidrológica (HEC-HMS) e hidrodinâmica (FLO-2D) com a calibração e validação e posterior análise dos resultados gerados. Para mapear as áreas de perigo foi utilizado o Índice de Perigo com consideração em que o perigo da inundação é função unicamente da profundidade da lâmina de água e de sua velocidade. Este mapa criado pode ser utilizado no plano diretor do município para definir quais atividades podem ser feitas nas determinadas áreas.

Palavras-chave: Inundação, Perigo, Modelagem.

ABSTRACT

The Santa Catarina state has suffered from natural hazards, mainly floods since colonization periods. Independent of the measures adopted at natural hazards prevention, the first step is to recognize the hazard and then the risk occurrence. The present work mapped flooding hazard areas to Braço do Baú watershed, in Ilhota city, Santa Catarina state. Hydrological investigation of the watershed was done, as well as hydrological and hydrodynamic modeling (HEC-HMS and FLO-2D) with calibration and validation. For elaborating the hazard map, the Hazard Index was used with consideration that flood hazard is a function of water flow depth and velocity. This map can be used for the master plan when the Ilhota city determines which activities might be exercised at some specified areas.

Keywords: Flood, Hazard, Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução para uma enchente.....	38
Figura 2 - Diagrama do perigo de inundação.....	41
Figura 3 - Níveis de perigo discretizados	42
Figura 4 - Esquema do processo de calibração.....	47
Figura 5 - Localização da bacia do Braço do Baú	51
Figura 6 - Divisões do Complexo do Baú.....	52
Figura 7 - Divisão de Estudo da Bacia do Braço do Baú.....	53
Figura 8 - Localização dos Pontos de Medição	61
Figura 9 - Configuração da modelagem 2D com e sem os perfis dos rios.....	63
Figura 10 - Fluxograma de modelagem conjunto de modelos hidrológico e hidrodinâmico.....	64
Figura 11 - Hidrogramas de Calibração de Luiz Alves	67
Figura 12 - Diferença dos dados calculados dos observados para a bacia de Luiz Alves.....	68
Figura 13 - Medição com GPS de precisão	70
Figura 14 - Análise das áreas inundadas.....	71
Figura 15 - Mapa de Inundação - Período de Retorno de 5 anos.....	72
Figura 16 - Mapa de Inundação - Período de Retorno de 20 anos	73
Figura 17 - Mapa de Inundação - Período de Retorno de 50 anos	74
Figura 18 - Mapa de Inundação - Período de Retorno de 100 anos	75
Figura 19 - Mapa de Perigo de Inundação.....	76
Figura 20 - Mapa de Perigo de Inundação (Corpo Hídrico)	77
Figura 21 - Hidrogramas das BC01-08 com TR de 5 anos.....	87
Figura 22 - Hidrogramas das BC09-16 com TR de 5 anos.....	88
Figura 23 - Hidrogramas das BC01-08 com TR de 20 anos	89
Figura 24 - Hidrogramas das BC09-16 com TR de 20 anos	90
Figura 25 - Hidrogramas das BC01-08 com TR de 50 anos	91
Figura 26 - Hidrogramas das BC09-16 com TR de 50 anos	92
Figura 27 - Hidrogramas das BC01-08 com TR de 100 anos	93
Figura 28 - Hidrogramas das BC09-16 com TR de 100 anos	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre chuvas diárias (P_d) e de 24 horas (P_{24h})	34
Tabela 2 - Relação entre as diferentes durações de chuva	34
Tabela 3 - Distribuições de Huff Adimensionais Acumuladas	36
Tabela 4 - Níveis de Perigo de Inundação	43
Tabela 5 - Características das Subbacias de Contribuição e da Área Inundável	50
Tabela 6 – Informações sobre os Dados de Campo	54
Tabela 7 - Informações sobre os Dados Calculados	55
Tabela 8 - Informações sobre os Dados Adquiridos	55
Tabela 9 - Características das Estações Pluviométricas	57
Tabela 10 - Estrutura do HEC-HMS	59
Tabela 11- Dados utilizados para o Método do Hidrograma Unitário de Clark	60
Tabela 12 - Comparação dos volumes totais	68
Tabela 13 - Comparação das vazões de pico	68
Tabela 14 - Calibração do FLO-2D	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D – Bidimensional

AMI - Área Máxima Inundada

ANA – Agência Nacional de Águas

BC – Subbacia de contribuição

EM-DAT – Emergency Disaster Data Base

GPS – Global Position System

HEC-HMS – Hydrologic Modeling System

i-d-f – Intensidade, Duração e Frequência

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas

IP – Índice de Perigo

SCS – Soil Conservation Service

VMI – Volume Máximo Inundado

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>Símbolo</i>	<i>Descrição</i>	<i>Unidade</i>
A	Área da bacia	[L ²]
a _i	Peso da i-ésima estação pluviométrica	-
CN	Número de deflúvio	-
Cov(X,Y)	Covariância entre os valores de x e y	-
D _i	Distância da i-ésima estação pluviométrica até a estação com falha	[L]
h	Profundidade de inundação ou fluxo	[L]
i	Intensidade da precipitação (mm/h)	[L.T ⁻¹]
I _{12h}	Intensidade de 12 horas de duração	[L.T ⁻¹]
I _{10h}	Intensidade de 10 horas de duração	[L.T ⁻¹]
I _{8h}	Intensidade de 8 horas de duração	[L.T ⁻¹]
I _{6h}	Intensidade de 6 horas de duração	[L.T ⁻¹]
I _{4h}	Intensidade de 4 horas de duração	[L.T ⁻¹]
I _{2h}	Intensidade de 2 horas de duração	[L.T ⁻¹]
I _{1h}	Intensidade de 1 hora de duração	[L.T ⁻¹]
I _{30min}	Intensidade de 30 minutos de duração	[L.T ⁻¹]
I _{25min}	Intensidade de 25 minutos de duração	[L.T ⁻¹]
I _{20min}	Intensidade de 20 minutos de duração	[L.T ⁻¹]
I _{15min}	Intensidade de 15 minutos de duração	[L.T ⁻¹]

$I_{10\text{min}}$	Intensidade de 10 minutos de duração	$[L.T^{-1}]$
$I_{5\text{min}}$	Intensidade de 5 minutos de duração	$[L.T^{-1}]$
I_a	Perda inicial	$[L]$
IP	Índice de Perigo	$[L^2.T^{-1}]$
J	Declividade média dos rios das bacias	Partes . 10^{-4}
K	Constante de armazenamento do reservatório linear	$[T]$
$k, m, b \text{ e } m$	Coeficientes	-
P_d	Precipitação diária	$[L]$
P_i	Dado da i-ésima estação pluviométrica	$[L]$
P_t	Precipitação total	$[L]$
P_x	Dado faltante da estação pluviométrica com falha	$[L]$
P_{24h}	Precipitação de 24 horas de duração	$[L]$
P_{12h}	Precipitação de 12 horas de duração	$[L]$
P_{10h}	Precipitação de 10 horas de duração	$[L]$
P_{8h}	Precipitação de 8 horas de duração	$[L]$
P_{6h}	Precipitação de 6 horas de duração	$[L]$
P_{4h}	Precipitação de 4 horas de duração	$[L]$
P_{2h}	Precipitação de 2 horas de duração	$[L]$
P_{1h}	Precipitação de 1 hora de duração	$[L]$
$P_{30\text{min}}$	Precipitação de 30 minutos de duração	$[L]$

$P_{25\text{min}}$	Precipitação de 25 minutos de duração	[L]
$P_{20\text{min}}$	Precipitação de 20 minutos de duração	[L]
$P_{15\text{min}}$	Precipitação de 15 minutos de duração	[L]
$P_{10\text{min}}$	Precipitação de 10 minutos de duração	[L]
$P_{5\text{min}}$	Precipitação de 5 minutos de duração	[L]
S	Capacidade de retenção de água no solo	[L]
S_f	Componente de declividade de atrito baseado na Equação de Manning	[L. L ⁻¹]
S_o	Inclinação do leito	[L. L ⁻¹]
t	Tempo de precipitação	[T]
td	Tempo total da precipitação	[T]
TR	Período de retorno	[T]
TR(y)	Período de retorno para determinada altura pluviométrica	[T]
v	Velocidade do escoamento	[L.T ⁻¹]
V	Velocidade da profundidade média uma das oito direções x	[L.T ⁻¹]
y	Altura pluviométrica	[L]
\bar{y}	Média dos valores de precipitação	[L]
α	Parâmetro de escala	-
β	Parâmetro de posição	-
σ	Desvio padrão	-
σ_x e σ_y	Desvios padrão dos valores de x e y.	-
$\rho_{x,y}$	Coefficiente de correlação entre os dados da matriz x e da matriz y	-

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	<i>OBJETIVOS.....</i>	29
1.1.1	Objetivo Geral	29
1.1.2	Objetivos Específicos	29
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	<i>PRECIPITAÇÃO.....</i>	31
2.1.1	Preenchimento de Falhas	31
2.1.2	Precipitação Média em uma Área	32
2.1.3	Análise de Intensidade, Duração e Frequência	32
2.1.4	Distribuição Temporal.....	35
2.1.5	Duração Crítica.....	37
2.2	<i>INUNDAÇÕES</i>	37
2.3	<i>MAPA DE PERIGO E ÍNDICE DE PERIGO.....</i>	39
2.4	<i>MODELAGEM MATEMÁTICA.....</i>	43
2.4.1	HEC-HMS.....	44
2.4.2	FLO-2D	45
2.4.3	Calibração	46
2.4.4	Validação.....	48
3	MATERIAL E MÉTODOS	49
3.1	<i>ÁREA DE ESTUDO</i>	49
3.2	<i>DADOS UTILIZADOS.....</i>	54
3.3	<i>PRECIPITAÇÃO DE PROJETO</i>	56
3.4	<i>MODELAGEM HIDROLÓGICA COM HEC-HMS</i>	58
3.5	<i>MODELAGEM HIDRODINÂMICA COM FLO-2D.....</i>	62
3.6	<i>MAPA DE INUNDAÇÃO, ÍNDICE DE PERIGO E MAPA DE PERIGO.....</i>	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	66
4.1	<i>EQUAÇÃO DE CHUVAS INTENSAS PARA A ÁREA DE ESTUDO.....</i>	66
4.2	<i>HIDROGRAMAS DE CONTRIBUIÇÃO PARA UMA ÁREA INUNDÁVEL</i>	67
4.3	<i>IDENTIFICAÇÃO, DETALHAMENTO E COMPARAÇÃO DAS ÁREAS INUNDADAS.....</i>	69
4.4	<i>MAPEAMENTO DAS ÁREAS DE PERIGO DE INUNDAÇÃO</i>	76
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	78
	REFERÊNCIAS	80
	APÊNDICE A – Hidrogramas de projeto para 5, 20, 50 e 100 anos.	87

1 INTRODUÇÃO

Desde os tempos de colonização o estado de Santa Catarina já convive com desastres naturais, principalmente as inundações. A forma com que os colonizadores dividiram as terras com o principal objetivo de utilizá-las para a produção agrícola foi o principal motivo para os frequentes desastres naturais. Os desastres naturais são caracterizados pela ocorrência de fenômenos naturais que prejudicam de alguma forma o homem e seu patrimônio.

Entre 1999 e 2008 no Brasil ocorreram pelo menos 49 grandes episódios de secas, inundações, deslizamentos de terra, totalizando 5,2 milhões de pessoas atingidas, 1.168 óbitos e um prejuízo econômico de US\$ 3,5 bilhões (EM-DAT, 2011). Dois episódios recentes e marcantes no país foram as tragédias nos estados de Santa Catarina em 2008 e Rio de Janeiro em 2011.

Nas últimas décadas, houve um grande crescimento de ocorrências de desastres naturais. Para Marcelino *et al.* (2006) os desastres naturais aumentaram em todo o globo em função do crescimento populacional, segregação socioespacial, acumulação de capital fixo em zonas perigosas, avanços tecnológicos das comunicações e mudanças globais.

De acordo com a Emergency Disasters Data Base (EM-DAT) os desastres naturais podem ser subdivididos em: biológicos, geofísicos, climatológicos, hidrológicos, meteorológicos e extraterrestres. Dos desastres hidrológicos podemos destacar as inundações e os movimentos de massa úmidos. Kobiyama *et al.* (2010) discutem que entre 1950 e 1980 os desastres hidrológicos, inundações seguidas dos escorregamentos, são os desastres naturais que mais crescem em todo o mundo. Através da análise do banco de dados do EM-DAT, pode-se observar que o mais relevante desastre natural no Brasil é o de inundações, responsável por mais de 60% dos mortos e das perdas patrimoniais entre os anos de 1982 e 2010, em relação a todos os desastres naturais.

Com a carência e muitas vezes desrespeito ao planejamento urbano das cidades e à legislação, áreas de risco são ocupadas, além da alteração do meio natural sem um estudo prévio adequado. Todos estes fatores aumentam a probabilidade de ocorrerem desastres naturais. O desastre natural é um sintoma da fraqueza da sociedade, pois demonstra a incapacidade do governo no gerenciamento das áreas de perigo.

Segundo Kobiyama *et al.* (2004b), existem dois tipos de medidas preventivas básicas: as estruturais e as não-estruturais. As medidas estruturais envolvem obras de engenharia, como as realizadas para a contenção de cheias, tais como: barragens, diques, alargamento de rios e reflorestamento. Contudo, tais obras são complexas e caras. As medidas não-estruturais geralmente envolvem ações de planejamento e gerenciamento, como sistemas de alerta e zoneamento ambiental. Observa-se grande vantagem nas medidas-não estruturais, já que estas não produzem impactos ao meio ambiente e o custo para sua implantação é muito reduzido. A desvantagem destas medidas é a usual demora em sua implantação efetiva. Para o sucesso destas medidas sempre é necessária a colaboração da comunidade local.

Independente das medidas a serem adotadas na prevenção de desastres naturais, a primeira etapa consiste na identificação do perigo e em seguida do risco da ocorrência. Marcelino *et al.* (2006) comentam que um dos instrumentos de análise de risco mais eficientes é o mapeamento de áreas de risco. A partir deste mapa é possível elaborar medidas preventivas, planificar as situações de emergência e estabelecer ações conjuntas entre a comunidade e o poder público, com o intuito de promover a defesa permanente contra os desastres naturais.

Visto estas considerações o presente trabalho mapeou as áreas de perigo de inundações para a Bacia do Braço do Baú, localizada no município de Ilhota/SC. Para isto foram realizadas investigações hidrológicas da bacia, assim como a modelagem hidrológica e hidrodinâmica com calibração e validação e posterior análise dos resultados gerados.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Mapear as áreas de perigo de inundação na Bacia do Braço do Baú, no município de Ilhota – SC.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Determinar uma equação de chuvas intensas para a área de estudo;
- b) Gerar hidrogramas de contribuição para uma área inundável;
- c) Delimitar e detalhar a área inundável;
- d) Estruturar um mapa de perigo em função de diferentes períodos de retorno de precipitação e intensidades de perigo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PRECIPITAÇÃO

Vários autores abordam a importância de aspectos da precipitação nas inundações. Rahman *et al.* (2002) afirmaram que os fatores primordiais da precipitação que interferem no escoamento são a duração, a intensidade, os padrões temporais e de área e a infiltração no solo. Loukas (2002) comentou da importância da variação temporal da precipitação e aplica análises estatísticas fazendo comparações com dados observados para estimar esta variação. Canholi (2005) discutiu a influência da distribuição temporal das precipitações na drenagem urbana e realizou uma revisão bibliográfica sobre o assunto.

2.1.1 Preenchimento de Falhas

De acordo com Tucci (1993), em qualquer momento da obtenção dos dados de precipitação pode ocorrer a existência de períodos sem informação ou com falhas de observação, devido a problemas com os aparelhos de registro e/ou com o operador do posto. Os dados coletados devem ser submetidos a uma análise antes de serem utilizados. Singh (1992) mencionou que existem diversos métodos para preencher falhas. Um dos métodos mencionados é o Método da Distância Inversa. Este método consiste em calcular pesos para estações disponíveis, baseando-se nas suas distâncias em relação elas e a estação com falhas:

$$a_i = \frac{1/D_i^2}{\sum_{i=1}^N 1/D_i^2} \dots\dots\dots(1)$$

onde a_i é o peso da i -ésima estação; e D_i é a distância da i -ésima estação até a estação com falha. Com os pesos calculados utilizando a média ponderada, obtém-se o dado da precipitação faltante para a estação com falha:

$$P_x = \sum_{i=1}^N a_i \cdot P_i \dots\dots\dots(2)$$

onde P_x é o dado faltante da estação com falha; e P_i é a i -ésima estação próxima.

2.1.2 Precipitação Média em uma Área

De acordo com Singh (1992), diversos fatores afetam a distribuição da chuva em um terreno. A rede de estações pluviométricas deve ser projetada para aperfeiçoar a coleta de dados para a boa representação desta distribuição. O método para estimar a precipitação média em uma área deve conseguir representar esta distribuição de forma razoável. Para Tucci (1993), a precipitação média é uma lâmina de água de altura uniforme distribuída sobre toda a área considerada, associada a um período de tempo dado.

Existem diversos métodos para determinar a precipitação média numa área, conforme a ponderação que se faz das observações pontuais disponíveis. Tucci (1993) considerou que o Método de Thiessen trabalha com a não-uniformidade da distribuição espacial dos pontos, mas não leva em conta o relevo da bacia. A ponderação de cada estação consiste na em polígonos de abrangência que são criados levando em conta todas as estações consideradas para o estudo.

2.1.3 Análise de Intensidade, Duração e Frequência

Para trabalhos de engenharia é necessário conhecer as três grandezas que caracterizam as precipitações máximas: intensidade, duração e frequência (Tucci, 1993). A determinação da relação entre estas três variáveis (curvas i-d-f) deve ser deduzida das observações das chuvas intensas durante um período de tempo suficientemente longo e representativo dos eventos extremos do local. A metodologia de séries anuais baseia-se na seleção das maiores precipitações anuais de uma duração escolhida que representaram os eventos extremos.

2.1.3.1 Distribuição de Extremos

Com base nesta série de valores de precipitação obtidos, é ajustada uma distribuição de extremos que melhor se ajuste a estes valores. Para Naghnetini & Pinto (2007) o método mais utilizado para se calcular a distribuição dos valores extremos é a Distribuição de Valores Extremos do Tipo I, mais conhecida como Distribuição de Gumbel. Então, a função de probabilidade acumulada da Distribuição de Gumbel é dada como:

$$F_y(y) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{y - \beta}{\alpha} \right) \right] \dots\dots\dots$$

para $-\infty < y < \infty$, $-\infty < \beta < \infty$, $\alpha > 0$(3)

onde y é a quantidade de chuva; α é o representa o parâmetro de escala; e β é o parâmetro de posição. Os parâmetros podem ser relacionados da seguinte forma:

$$\sigma^2 = \frac{\pi^2 \cdot \alpha^2}{6} \dots\dots\dots(4)$$

$$\bar{y} = \beta + 0,5772 \cdot \alpha \dots\dots\dots(5)$$

onde σ é o desvio padrão; e \bar{y} é a média dos valores de precipitação. A probabilidade acumulada também pode ser descrita como:

$$F_y(y) = 1 - \frac{1}{TR(y)} \dots\dots\dots(6)$$

onde $TR(y)$ é o período de retorno para determinada precipitação.

2.1.3.2 Curva I-D-F

Na construção da curva i-d-f é necessário ajustar uma distribuição estatística aos maiores valores anuais de precipitação para cada duração (Tucci, 1993). A escolha das durações depende da discretização dos dados e da representatividade desejada para as curvas. DAEE/CETESB (1980) frisa a carência de dados pluviográficos no país, ou seja, aqueles que obtêm precipitações com intervalos de tempos menores do que o diário. A companhia então propõe relações entre chuvas de diferentes

tempos de durações que são demonstradas nas Tabelas 1 e 2. Estas relações foram criadas a partir do estudo de Pfafstetter (1957) que foi reproduzidos no Brasil. Este estudo apresenta curvas de intensidade de precipitação, duração e frequência para 98 postos do serviço de meteorologia do Ministério da Agricultura em diferentes locais do Brasil. A maioria das série de dados utilizados foram de 10 anos.

Tabela 1 - Relação entre chuvas diárias (P_d) e de 24 horas (P_{24h})

TR	anos	2	4	5	8	10	15
P_{24h}/P_d	-	1,130	1,130	1,130	1,130	1,130	1,133
TR	anos	20	25	40	50	75	100
P_{24h}/P_d	-	1,136	1,140	1,146	1,150	1,140	1,150

FONTE: DAEE/CETESB (1980)

Tabela 2 - Relação entre as diferentes durações de chuva

Duração	Precipitação total	Intensidade
t	P	i
-	[mm]	[mm/h]
12 h	$P_{12h}=0,85 \times P_{24h}$	$I_{12h}=P_{12h}/12$
10 h	$P_{10h}=0,82 \times P_{24h}$	$I_{10h}=P_{10h}/10$
8 h	$P_{8h}=0,78 \times P_{24h}$	$I_{8h}=P_{8h}/8$
6 h	$P_{6h}=0,72 \times P_{24h}$	$I_{6h}=P_{6h}/6$
4 h	$P_{4h}=0,63 \times P_{24h}$	$I_{4h}=P_{4h}/4$
2 h	$P_{2h}=0,52 \times P_{24h}$	$I_{2h}=P_{2h}/2$
1 h	$P_{1h}=0,42 \times P_{24h}$	$I_{1h}=P_{1h}/1$
30 min	$P_{30min}=0,74 \times P_{1h}$	$I_{30min}=P_{30min} \ 60/30$
25 min	$P_{25min}=0,91 \times P_{30min}$	$I_{25min}=P_{25min} \ 60/25$
20 min	$P_{20min}=0,81 \times P_{30min}$	$I_{20min}=P_{20min} \ 60/20$
15 min	$P_{15min}=0,70 \times P_{30min}$	$I_{15min}=P_{15min} \ 60/15$
10 min	$P_{10min}=0,54 \times P_{30min}$	$I_{10min}=P_{10min} \ 60/10$
5 min	$P_{5min}=0,34 \times P_{30min}$	$I_{5min}=P_{5min} \ 60/5$

FONTE: DAEE/CETESB (1980)

Bell (1969) cita que as informações da Tabela 2 independem do período de retorno e que os erros médios variam de 5 a 8%, que são da mesma ordem de grandeza dos erros devidos a deficiência de amostragem. (DAEE/CETESB, 1980)

A área de abrangência deste método são as redondezas onde as 98 estações estão localizadas. Santa Catarina possui 3 dessas estações, em Joinville, Florianópolis e Blumenau. Com estas informações pode-se criar uma curva que relaciona duração e intensidade para cada período de retorno encontrado na distribuição dos extremos.

2.1.3.3 Equação de Chuvas Intensas (I-D-F)

Brutsaert (2005) mencionou uma equação amplamente utilizada para calcular a intensidade de uma precipitação a partir de seu tempo de retorno e duração:

$$i = \frac{k.TR^m}{(t+b)^n} \dots\dots\dots(7)$$

onde i é a intensidade (mm/h), TR é o período de retorno (anos), t é o tempo de precipitação (minutos) e k , m , b e n são coeficientes a serem determinados com base na Curva i-d-f. A evolução para equação, denominada de equação de chuvas intensas, pode ser observada nos trabalhos de Meyer (1917), Sherman (1931) e Bernard (1932). Brutsart (2005) ainda comentou que através de relatos na literatura os valores dos coeficientes variam normalmente entre 0,15 a 0,5 para “ m ”, 5 a 10 min para “ b ” e 0,6 a 0,8 para “ n ”.

Tucci (1993) comentou a possibilidade de ajuste das curvas de i-d-f para a equação de i-d-f. O ajuste pode ser realizado linearizando a equação (7), através do uso de logaritmos e utilizando a regressão múltipla para determinação dos parâmetros. O ajuste pode ser aperfeiçoado realizando-se a correlação dos valores das curvas com os da equação.

2.1.4 Distribuição Temporal

Huff (1967) analisou 11 anos de dados de precipitações de uma rede de 49 estações que cobriam uma área de 1.000 km². Assim foram

confeccionados 4 tipos hietogramas adimensionais, que se diferenciam principalmente pela localização de sua precipitação máxima, chamados de quartis, os quais representam as precipitações analisadas. Estes quartis não possuem a denotação estatística e sim apenas diferentes hietogramas com picos de precipitação distribuídas de formas diferentes. De acordo com Singh (1992) o primeiro quartil representa as tempestades mais severas, o quarto quartil representa as de intensidade medianas, o segundo e terceiro quartil representam tempestades com decréscimo de intensidade. A Tabela 3 representa os quatro quartis adimensionais para efeito de cálculo.

Tabela 3 - Distribuições de Huff Adimensionais Acumuladas

Tempo de Chuva	Primeiro quartil	Segundo quartil	Terceiro quartil	Quarto quartil
t/td	P/Pt	P/Pt	P/Pt	P/Pt
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000
0,05	0,063	0,015	0,020	0,020
0,10	0,178	0,031	0,040	0,040
0,15	0,333	0,070	0,072	0,055
0,20	0,500	0,125	0,100	0,070
0,25	0,620	0,208	0,122	0,085
0,30	0,705	0,305	0,140	0,100
0,35	0,760	0,420	0,155	0,115
0,40	0,798	0,525	0,180	0,135
0,45	0,830	0,630	0,215	0,155
0,50	0,855	0,725	0,280	0,185
0,55	0,880	0,805	0,395	0,215
0,60	0,898	0,860	0,535	0,245
0,65	0,915	0,900	0,690	0,290
0,70	0,930	0,930	0,790	0,350
0,75	0,944	0,948	0,875	0,435
0,80	0,958	0,962	0,935	0,545
0,85	0,971	0,974	0,965	0,740
0,90	0,983	0,985	0,985	0,920
0,95	0,994	0,993	0,995	0,975
1,00	1,000	1,000	1,000	1,000

FONTE: USDA (1986)

Monteiro & Kobiyama (2011) discutiram a influência da variação temporal das precipitações em inundações. Os resultados dos estudos demonstram que quanto o pico do hietrograma ocorrer mais tarde, maior será a influência da precipitação sobre a inundação. Com este motivo por segurança, deve-se utilizar o quarto quartil de Huff para dimensionar obras de engenharia e criação de mapas de perigo e risco.

2.1.5 Duração Crítica

Para Tucci *et al.* (1995) na utilização do Método Racional adota-se para a chuva crítica de uma pequena bacia hidrográfica uma duração igual ao tempo de concentração da bacia considerando que a precipitação efetiva tenha intensidade constante. Porém no caso geral, a duração crítica deve ser pesquisada, aplicando-se diversos hietogramas de projeto, com durações crescentes a um método de transformação chuva-vazão, e analisando-se os resultados dos valores das vazões de pico e dos volumes dos hidrogramas gerados.

2.2 INUNDAÇÕES

Inundação, deslizamento, estiagem, etc. são fenômenos naturais, observados com frequência na natureza. Quando estes fenômenos ocorrem em locais onde o ser humano atua, como, por exemplo, em cidades, próximo a vilas ou casas, eles provocam danos materiais e humanos à sociedade. Neste caso são tratados como desastres naturais (Kobiyama *et al.*, 2006).

Para Singh (1992) uma inundação é definida como o momento em que um lago, reservatório ou um canal é incapaz de manter a quantidade de água recebida. Kobiyama *et al.* (2006) comentaram que a inundação é o aumento do nível dos rios além da sua vazão normal, ocorrendo o transbordamento de suas águas sobre as áreas próximas a ele. Estas áreas planas próximas aos rios sobre as quais as águas extravasam são chamadas de planícies de inundação como demonstrado na Figura 1.

De acordo com Castro *et al.* (2007) as inundações podem ser classificadas em função da magnitude e da tipologia. Em função da magnitude, através de dados comparativos de longo prazo, as inundações são classificadas como: excepcionais; de grande magnitude;

normais ou regulares e de pequena magnitude. Em função da tipologia as inundações são classificadas como: enchentes ou inundações graduais; enxurradas ou inundações bruscas; alagamentos e inundações litorâneas provocadas pela brusca invasão do mar.

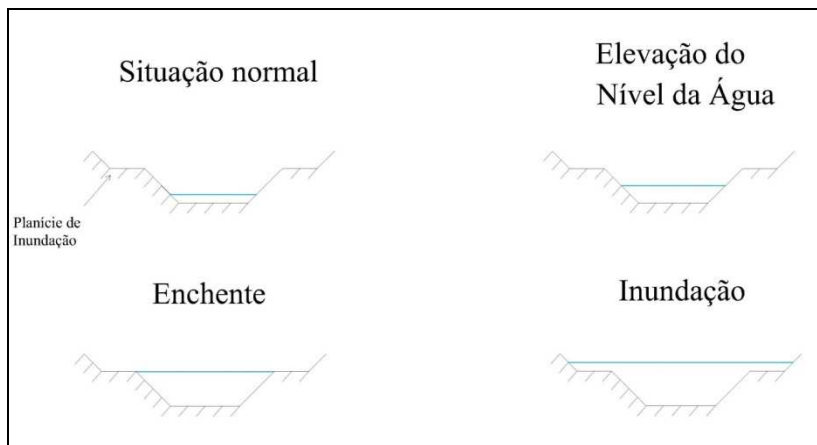


Figura 1 - Evolução para uma enchente

Castro *et al.* (2007) caracterizam as diferentes tipologias da seguinte maneira:

- Enchentes ou inundações graduais: As águas elevam-se de forma paulatina e previsível, mantêm a situação de cheia durante algum tempo e a seguir, escoam-se gradualmente. Estas inundações são cíclicas e nitidamente sazonais;
- Enxurradas ou inundações bruscas: São provocadas por chuvas intensas e concentradas, em regiões de relevo acidentado, caracterizando-se por produzirem súbitas e violentas elevações dos caudais, os quais se escoam de forma rápida e intensa. Este fenômeno costuma surpreender por sua violência e menor previsibilidade, exigindo uma monitorização complexa;
- Alagamentos: São as águas acumuladas no leito das rias e nos perímetros urbanos por fortes precipitações, em cidades com sistemas de drenagem deficiente;
- Inundações litorâneas provocadas pela brusca invasão do mar: Normalmente caracterizam-se como desastres secundários,

podendo ser provocadas por vendavais e tempestades marinhas, ciclones tropicais, trombas d'água, tsunamis e ressacas muito intensas.

2.3 MAPA DE PERIGO E ÍNDICE DE PERIGO

De acordo com Kobiyama *et al.* (2006) os termos “perigo” e “risco” são frequentemente utilizados como sinônimos, porém não são. O perigo é um fenômeno natural que ocorre em épocas e região conhecidas que podem causar sérios danos nas áreas sob impacto. Enquanto que o risco é a probabilidade de perda esperada para uma área habitada em um determinado tempo, devido à presença iminente de um perigo (UNDP, 2004). Chen *et al.* (2004) sugerem que risco pode ser visto como uma função de perigo, exposição e vulnerabilidade.

Tominaga *et al.* (2009) descrevem mapa de risco como a representação da probabilidade espacial e temporal de ocorrer um processo ou fenômeno com potencial de causar danos. Goerl (2010) desenvolveu um mapa de risco com o apoio de um mapa de perigo e um mapa de vulnerabilidade da área estudada.

Kobiyama *et al.* (2006) comentam que para a realização de um zoneamento eficaz é prioritário que as condições básicas de vivência sejam supridas. Em uma área destinada para uso residencial, por exemplo, é importante que esta não ofereça riscos aos bens materiais e físicos dos moradores. Para isto, uma série de dados deve ser disposta espacialmente e analisada hierarquicamente no sentido de indicar qual a área mais apropriada para este tipo de ocupação.

Ainda para estes autores no caso do mapeamento de perigo, podem ser utilizadas três metodologias distintas:

- Empírica: Após a ocorrência do fenômeno, a área atingida é verificada em trabalho de campo e considerada como área de perigo;
- Semi-empírica: Além de caracterizar a área atingida como área de perigo, os fatores ambientais (topografia, solo, etc.) também são analisados, sendo que os valores críticos de fatores que podem causar o mesmo fenômeno são determinados numericamente (peso). Com base nesses valores, as áreas que possuem características semelhantes, também serão consideradas como áreas de perigo;
- Física: Com base nas leis da física são analisados os mecanismos de ocorrência de determinado fenômeno. Depois utilização da modelagem com a realização de simulações numérica ou física, procura-se onde,

teoricamente, o fenômeno poderá ocorrer. Desta forma, todas as áreas em que as simulações mostrarem a possibilidade de ocorrência do fenômeno serão consideradas como área de perigo.

O Índice de Perigo (*IP*) proposto por Stephenson (2002) é:

$$IP = h \cdot v \dots\dots\dots (8)$$

onde *h* é a profundidade de inundação em metros; e *v* é a velocidade do escoamento em metros por segundo. Pode-se perceber que o *IP* é expressado pela vazão específica. Desta forma este índice está ligado diretamente à energia do escoamento. Pode-se então definir a energia mínima através da altura crítica e verificar qual a força que o escoamento possui. Este índice foi criado para indicar qual o local mais adequado para o desenvolvimento de uma localidade. Para isto, o autor propôs tipos diferentes de perigos associados a este índice de perigo (Figura 2). Os valores “0”, “1”, “2” e “3” servem apenas como denominação das áreas do gráfico para facilitar na utilização nos estudos.

PRENEVE (2001) propôs uma forma de criar o mapa de perigo de inundação que foi aplicada em Caracas, Venezuela. Esta metodologia foi baseada nos padrões suíços e australianos que estabelecem três zonas para identificar os diferentes níveis de perigo de um local específico. O mapa de perigo é uma função de frequência de inundação (período de retorno) e intensidade (índice de perigo). Eventos mais severos, relacionados à profundidade da lâmina da água e à velocidade, ocorrem com menor frequência. Pequenos eventos de inundação são mais frequentes, porém possuem um menor potencial de causar dano. Desta forma o nível do perigo de inundação é definido como uma combinação discreta de intensidade e período de retorno (Figura 3). Os valores do período de retorno podem ser alterados dependendo do tipo de estudo. A especificação do nível de perigo está na Tabela 4.

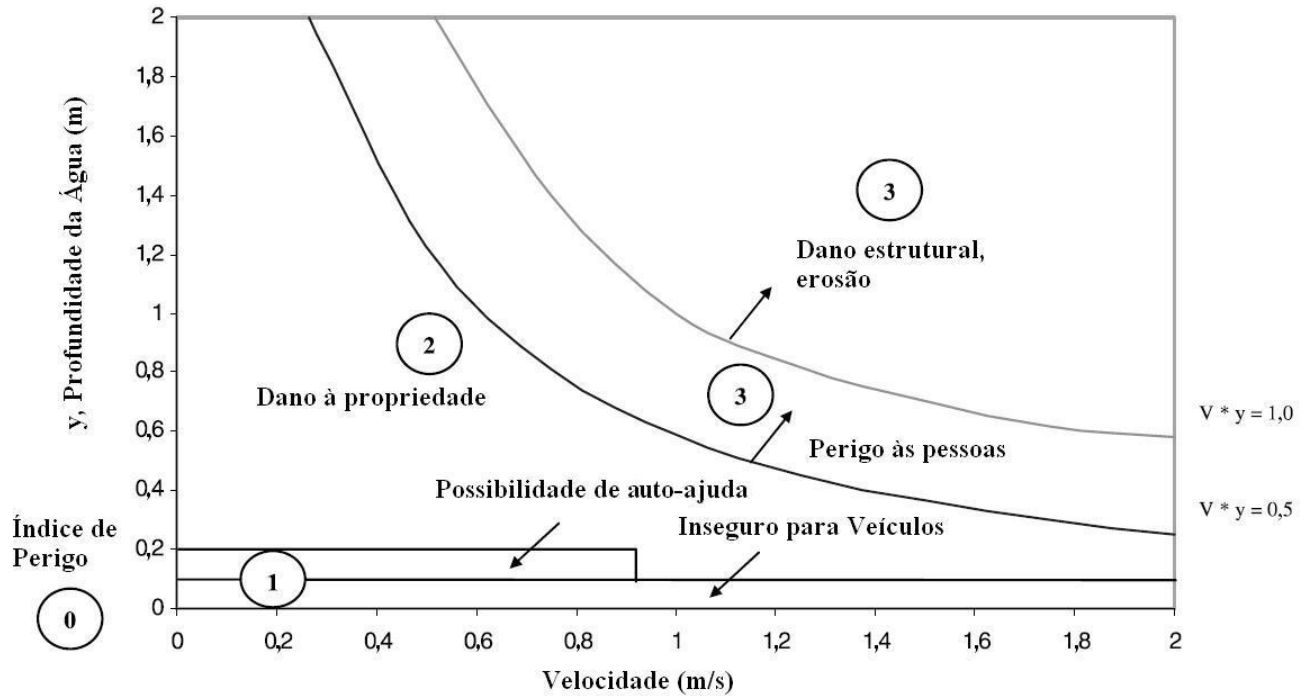


Figura 2 - Diagrama do perigo de inundação
 FONTE: Adaptado de Stephenson (2002)

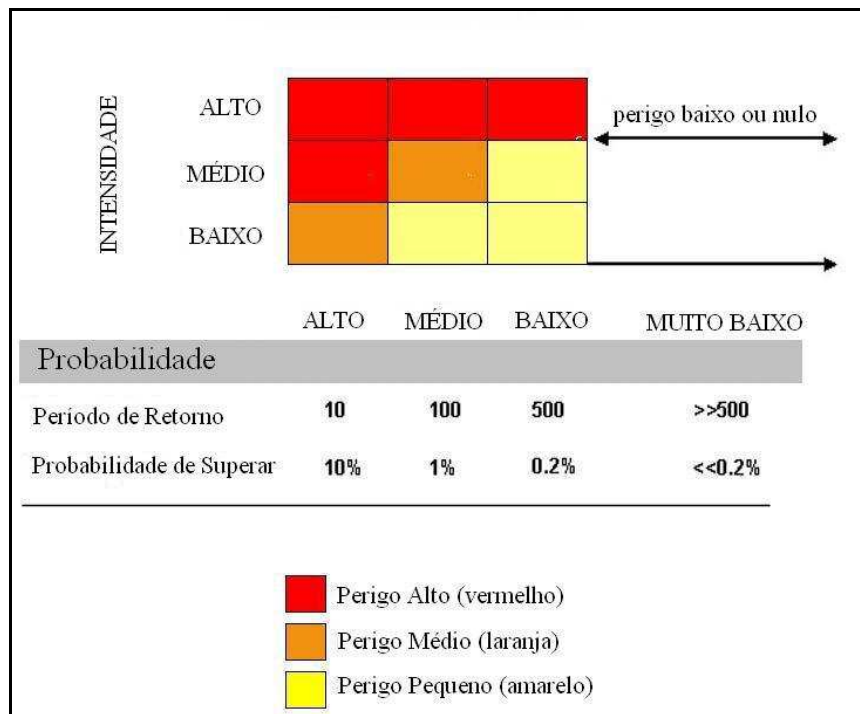


Figura 3 - Níveis de perigo discretizados

FONTE: Adaptado de PREVENE (2001)

Tabela 4 - Níveis de Perigo de Inundação

Definição do Perigo de Inundação		
<i>Nível do Perigo</i>	<i>Cor do Mapa</i>	<i>Descrição</i>
Alto (3)	Vermelho	As pessoas estão em perigo, tanto dentro quanto fora de suas casas. As construções estão em alto risco de serem destruídas.
Médio (2)	Laranja	As pessoas correm risco de morte fora de suas casas. Construções talvez sofram danos e podem ser destruídas, dependendo de suas características.
Baixo (1)	Amarelo	O risco de morte das pessoas é baixo ou inexistente. Construções talvez sofram um pouco de dano. A inundação e sedimentos podem afetar o interior destas.

FONTE: Adaptado de PREVENE (2001)

2.4 MODELAGEM MATEMÁTICA

De acordo com Machado (2005) a modelagem matemática é uma ferramenta, em geral, constituído de um conjunto de equações, que de forma simplificada, é utilizada para representar o comportamento de um sistema físico mais complexo. Kobiama *et al.* (2004a) se referem à modelagem matemática para prevenir os desastres ou minimizar os prejuízos causados por estes. Para os autores a modelagem matemática pode ser considerada como tratamento quantitativo dos fenômenos, na qual é empregada uma representação, ou seja, um modelo teórico que adequadamente reproduz os fenômenos considerados, capaz ainda de simular situações e eventualmente realizar previsões. A implementação de um modelo, qualquer que seja o detalhamento na representação dos processos considerados, requer monitoramento (observação contínua da natureza) para calibração deste modelo. Sem monitoramento não há possibilidade de modelação dos fenômenos considerados.

2.4.1 HEC-HMS

O software HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) foi desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (USACE-HEC, 2000). Este programa é gratuito e está disponível em <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>. O HEC-HMS é projetado para simular o processo de precipitação-vazão de sistemas de bacias hidrográficas dendríticas. Foi projetado para ser aplicável a uma ampla variedade de áreas geográficas para resolver uma grande variedade de possíveis problemas. Isto inclui grandes rios de bacias hidrográficas para fornecimento de água e estudos de inundação, até do escoamento de pequenas bacias hidrográficas urbanas ou naturais. Os hidrogramas produzidos pelo programa são utilizados diretamente ou em conjunto com outros softwares para estudos de disponibilidade de água, drenagem urbana, previsão de vazão, impacto do desenvolvimento da urbanização, dimensionamento de vertedouros de reservatórios, redução de danos de inundação, regime de planícies de inundação e sistemas de operação (USACE-HEC, 2010).

O HEC-HMS utiliza modelos separados para representar cada componente do processo de escoamento que são: Modelos que calculam o volume do escoamento; Modelos de escoamento direto (superficial e subsuperficial); Modelos de escoamento de base e modelos de fluxo no canal (USACE-HEC, 2000). Para Tavares & Castro (2005) o processamento de modelagem do HEC-HMS requer inicialmente a entrada de dados da bacia hidrográfica e dos dados meteorológicos. Para a bacia são escolhidos os métodos para o cálculo das perdas, de transformação do escoamento superficial, de composição do escoamento de base, de propagação em rios; considerando parâmetros relacionados a tais métodos, como a área das subbacias, tempo de concentração, fatores de perda por infiltração, evapotranspiração, e perdas em sumidouros e interceptação. Já para no modelo hidrológico é escolhido qual o formato de entrada da precipitação a ser utilizada na simulação.

2.4.2 FLO-2D

O modelo hidrodinâmico FLO-2D foi proposto por O'Brien et al. (1993). A origem deste modelo FLO-2D se deu a partir de um modelo desenvolvido por Jim O'Brien para a FEMA (Federal Emergency Management Agency) chamado MUDFLOW, em 1989, enquanto participava da FLO Engineering, Incorporation. Este software é desenvolvido nos Estados Unidos da América e é pago.

Este modelo é uma efetiva ferramenta para delimitar perigo de inundação e determinar formas de minimizar inundações. A utilidade do modelo é descoberta através de sua aplicação em diversos problemas de inundação. Iniciando com um cenário básico de escoamento superficial, detalhes podem ser adicionados para a simulação acionando diversos componentes como a criação de pontes, obstáculos e construções. Diversos hidrogramas de inundações podem ser adicionados para a mesma simulação, sendo eles referentes ao canal ou a planície de inundações. Pode-se simular a propagação da inundação que se movimenta sobre a planície de inundação, canais baixos ou ruas, o fluxo em inclinações adversas, a atenuação da propagação da inundação, a formação de lagos e a ocorrência de ressacas. Áreas urbanas, construções e obstruções do fluxo de água podem ser simuladas para considerar a perda do armazenamento e redirecionamento do caminho do fluxo. O componente de dique pode ser utilizado como alternativa para teste de mitigação (FLO-2D SOFTWARE INC., 2009).

FLO-2D é um modelo simples de conservação de volume. Ele transporta o volume da inundação dividido em uma série de grids (gradeamento) para o escoamento superficial ou através de segmentos de canais. A progressão de uma onda de cheia sobre o fluxo dominante é controlada pela topografia e resistência ao fluxo. A dinâmica da inundação em duas dimensões é realizada através de uma integração numérica das equações de movimento e da conservação do volume de fluidos tanto para uma inundação puramente de água como para um fluxo hiperconcentrado de sedimentos. A constituição geral das equações de fluidos inclui a equação de continuidade (Equação 9) e a equação de movimento (Equação 10):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hV}{\partial x} = i \dots\dots\dots(9)$$

$$S_f = S_o - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \dots\dots\dots(10)$$

onde h é a profundidade de fluxo; V é a velocidade da profundidade média uma das oito direções x , i é a intensidade da precipitação efetiva, S_f é o componente de declividade de atrito baseado na Equação de Manning, S_o é a inclinação do leito (FLO-2D SOFTWARE INC., 2009).

De acordo com O'Brien *et al.* (1993), para modificar a equação de movimento para a representação em duas dimensões deve-se adicionar à constituição das equações de continuidade:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} + \frac{\partial h V_y}{\partial y} = i \dots\dots\dots(11)$$

e as equações bidimensionais de movimento são:

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \dots\dots\dots(12)$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t} \dots\dots\dots(13)$$

No FLO-2D essas equações são resolvidas com um esquema numérico de diferenças finitas. Este algoritmo resolve a equação de momento para a velocidade do fluxo através dos limites de cada elemento de grid separadamente.

2.4.3 Calibração

A calibração pode chamada de otimização. De acordo com Tucci (1998), as técnicas de otimização são utilizadas em diferentes áreas do conhecimento para a busca da melhor solução de uma função matemática sujeita ou não a restrições. A otimização é a busca do valor de uma variável ou de n variáveis, que proporcionam o melhor resultado para uma função dependente destas variáveis, dentro de um objetivo e obedecendo as restrições.

A calibração utiliza dados observados de hidrometeorologia em uma sistemática procura pelos parâmetros que fornecem a melhor similaridade entre os valores calculados pelo modelo e os valores de vazão observados. No caso do HEC-HMS, existe procura sistemática para o melhor valor do parâmetro (Figura 4). Este procedimento se

inicia com a coleta de dados. Para os modelos chuva-vazão, os dados necessários são séries temporais de chuva e vazão. (USACE-HEC, 2000).

A calibração pode ser realizada de forma manual analisando-se principalmente graficamente os resultados simulados aos observados ou ainda de forma automática utilizando um modelo de otimização. Outra forma de realizar a calibração manual é através da análise da consistência dos dados simulados com o coeficiente de correlação

$$\rho_{x,y} = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \dots\dots\dots (14)$$

onde $\rho_{x,y}$ é o coeficiente de correlação entre os dados da matriz x e da matriz y , $Cov(X,Y)$ é a covariância entre os valores de x e y e σ_x e σ_y são os desvios padrão dos valores de x e y .

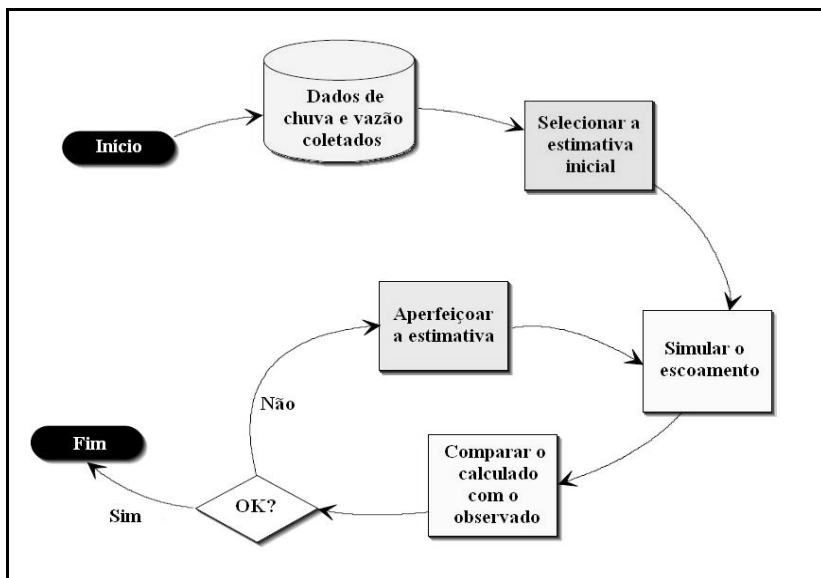


Figura 4 - Esquema do processo de calibração

FONTE: Adaptado de USACE-HEC, 2000

Barth *et al.* (1987) descreveu que o modelo de otimização é constituído por uma função objetivo que se quer maximizar ou minimizar. Além da função objetivo, comparecem também as funções de restrição que determinam a região viável das variáveis de decisão. O conjunto de valores das variáveis de decisão que satisfaz as funções de restrição é chamado de solução viável. Dentre as soluções viáveis, aquela que melhor satisfaz a função objetivo é a chamada de solução ótima.

De acordo com Tucci (1998) as técnicas iterativas de otimização são utilizadas para ajustar os parâmetros dos modelos hidrológicos porque normalmente a função objetivo resultante do uso destes modelos é implícita. Estas técnicas são as mais utilizadas para este tipo de problema. Estes métodos baseiam-se na busca do mínimo ou máximo da função através de um processo direcionado de tentativa. Os métodos iterativos possuem quatro características básicas que são: Definição do ponto de partida; Direção de pesquisa; Espaçamento de cada tentativa e Critérios de parada.

2.4.4 Validação

Segundo Greenberger *et al.* (1976) a validação é uma indicação do nível de confiança de um modelo sob uma condição limite e para um propósito específico. Este pensamento mostra a diferença da crença comum de que a validação é um “selo de aprovação” do modelo.

A validação de modelos hidrodinâmicos com eventos de inundação reais depende de diversos fatores incluindo a estimativa do volume do fluxo e área de inundação, estimativa apropriada da resistência do fluxo, representação da geometria de condução do canal, precisão e exatidão da representação topográfica do terreno e medidas do fluxo hidráulico incluindo o nível de água, a velocidade e profundidade da lâmina da água. As ferramentas para a validação de modelos hidráulicos incluem o estudo de modelos físicos, comparação com outros modelos numéricos ou replicação de eventos de inundações passadas (FLO-2D SOFTWARE INC., 2009).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é composta pela Bacia do Braço do Baú a qual faz parte do Complexo do Baú, e localiza-se no município de Ilhota, estado de Santa Catarina. O município possui 12.324 habitantes de acordo com o IBGE (2010) e um histórico marcado por problemas com inundações e está inteiramente dentro da bacia do Rio Itajaí (Figura 5). O Complexo do Baú possui quatro principais repartições, o Baú Baixo, o Baú Central, o Alto Baú e o Braço do Baú (Figura 6). A Bacia do Braço do Baú possui uma área de cerca de 48 km², e o comprimento de seu rio principal, que é caracterizada pela 4ª ordem de acordo com a hierarquia fluvial de Strahler (1952), é cerca de 15 km. Esta bacia é predominantemente rural, havendo poucas áreas de comércio, moradias e estradas.

De acordo com Lima *et al.* (2010), os usos do solo da bacia consistem em 50% de mata (capoeira, capoeirão, mata secundária e clímax), 15% de plantação de banana, 13% de capoeirinha, 11% de reflorestamento, 9% cultivo de arroz, 1% de outros cultivos e 1% solo exposto. Diversas obras já foram escritas referenciando os desastres naturais no Complexo do Baú, algumas delas com intuítos científicos, como em os trabalhos de Lima et al (2010) e Frank e Sevegnani (2009), além de outras com a intenção social baseadas em relatos dos acontecimentos, por exemplo, Menezes (2009) e Pereira (2009).

De acordo com o mapa hidrográfico do IBGE, a bacia do Braço do Baú possui uma hierarquia fluvial de Strahler composta de 39 rios de 1ª ordem, 9 rios de 2ª ordem, 2 rios de 3ª ordem e 1 rio da 4ª ordem. Pelas considerações das análises areais de bacias hidrográficas propostas por Christofoletti (1980) o Braço do Baú possui um Índice de Circularidade (Ic) de 0,59 m²/m², um Índice entre o Comprimento e a Área da Bacia (Ico) de 1,47 m/m, uma densidade de rios de 1,06 rios/km² e uma densidade de drenagem de 1,53 km/km².

Para viabilizar os estudos a Bacia do Braço do Baú foi dividida em 16 subbacias de contribuição (BC) e uma área inundável (Figura 7). As subbacias de contribuição foram diferenciadas da área inundável, pelo elevado potencial de inundação que a segunda possui por causa da grande diferença de declividade média dos rios principais de cada área (Tabela 5). Além disso, foram realizadas visitas no campo e através de

entrevistas com os moradores locais, foram verificadas quais destas bacias foram inundadas no evento extremo de 2008. Os mapas de perigo foram confeccionados apenas para a área inundável, visto a não necessidade deste estudo nas subbacias de contribuição devido à baixíssima densidade demográfica e o reduzido potencial de inundação devido à declividade média dos rios principais.

Tabela 5 - Características das Subbacias de Contribuição e da Área Inundável

Subbacias	Área (km ²)	Declividade Média do Rio Principal (%)
BC1	0,399	8,97
BC2	0,160	13,88
BC3	1,555	9,47
BC4	1,249	13,33
BC5	0,867	6,51
BC6	0,885	4,30
BC7	4,196	5,70
BC8	0,534	13,26
BC9	9,961	5,97
BC10	4,123	12,52
BC11	1,962	11,04
BC12	0,547	5,97
BC13	3,279	3,27
BC14	0,302	6,99
BC15	2,948	6,99
BC16	0,227	11,85
Área Inundável	14,65	0,37

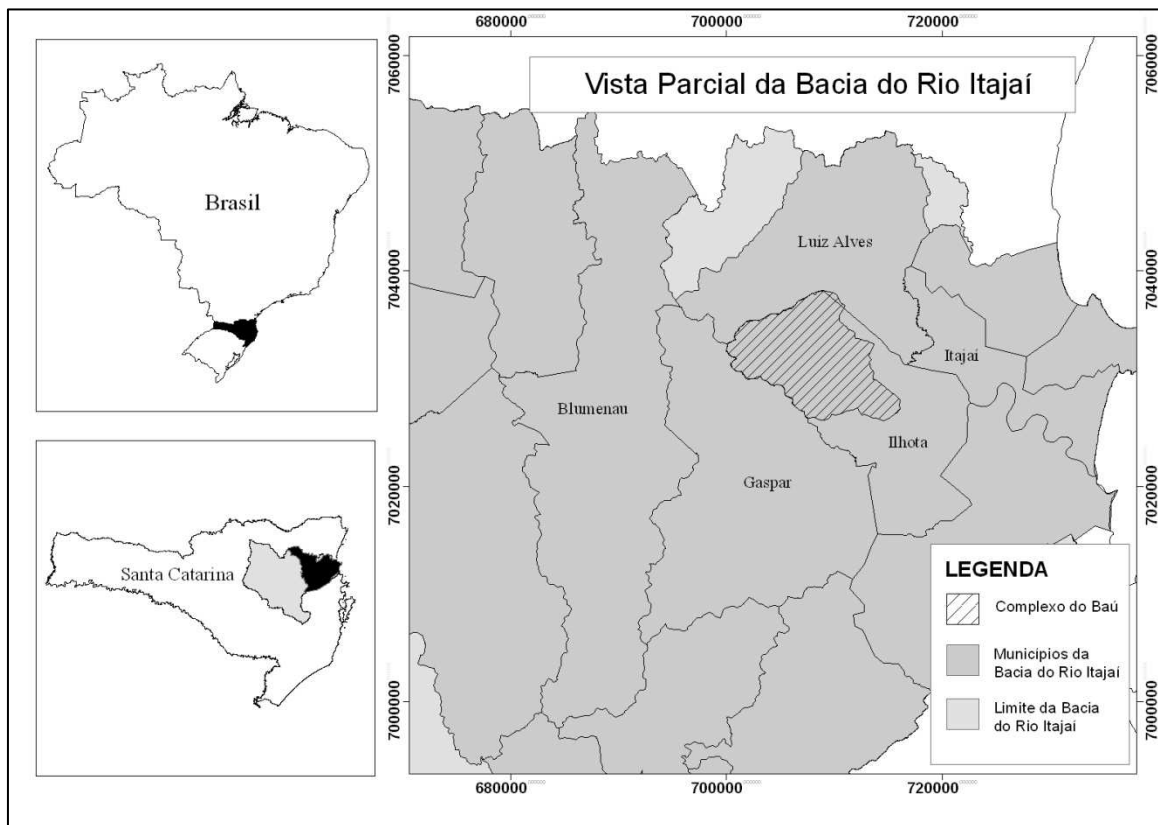


Figura 5 - Localização da bacia do Braço do Baú

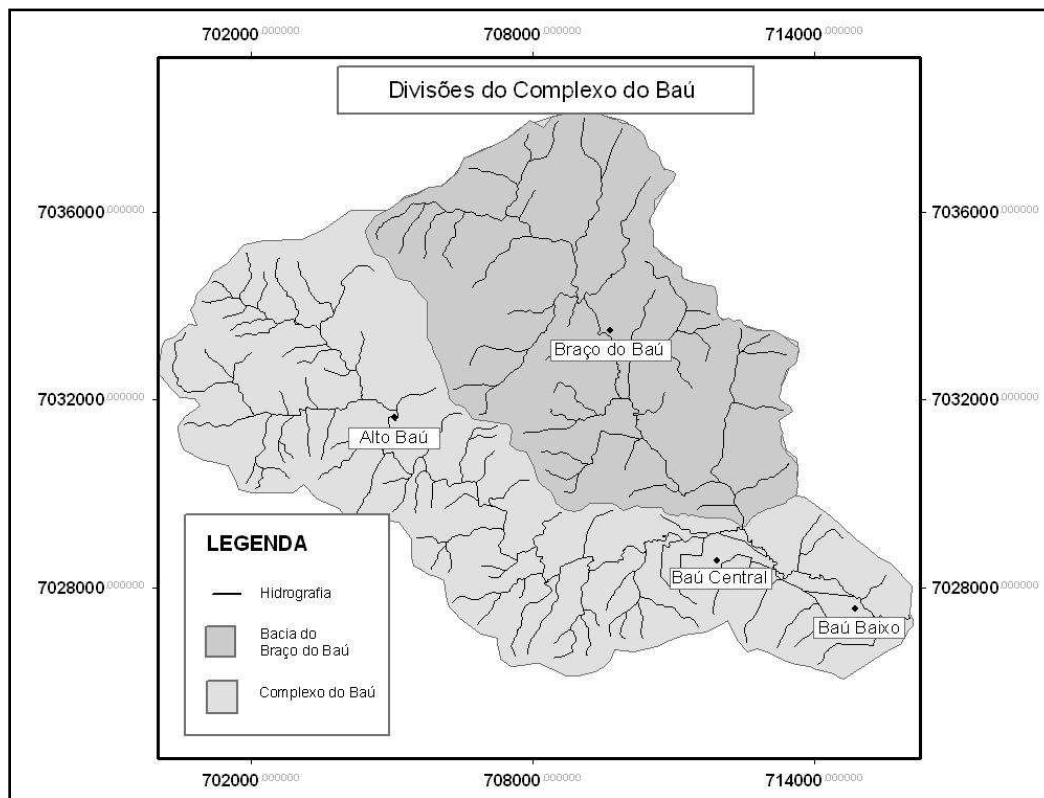


Figura 6 - Divisões do Complexo do Baú

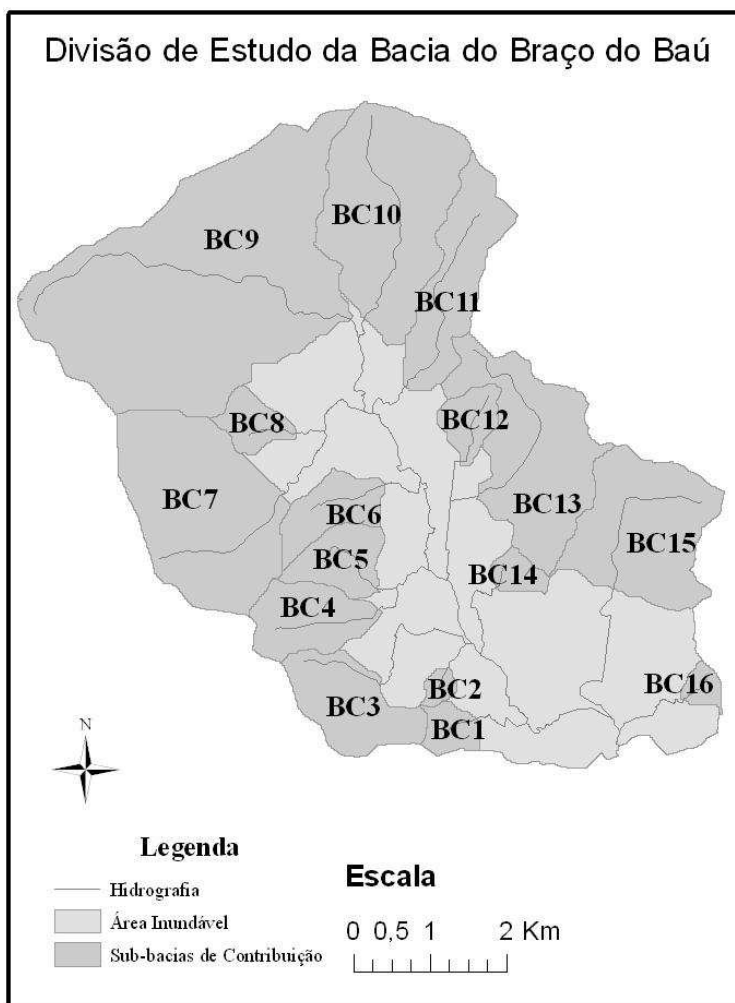


Figura 7 - Divisão de Estudo da Bacia do Braço do Baú

3.2 DADOS UTILIZADOS

Para realização da modelagem computacional são necessários os dados de entrada. Neste trabalho os dados foram separados em três tipos:

- Dado de campo: É aquele que o próprio pesquisador, ou sua equipe foram ao local de estudo adquirir as informações necessárias para o estudo através de equipamentos ou observação. Pode ser chamado também de dado com fonte primária (Tabela 6);
- Dado calculado: É aquele que é obtido através de deduções matemáticas baseadas em outros dados ou hipóteses (Tabela 7);
- Dado adquirido: É o dado adquirido de outras fontes sem serem as descritas nos itens anteriores, normalmente comprados ou cedidos por órgãos governamentais, empresas, universidades, pessoas físicas, entre outros. Pode ser chamado também de dado com fonte secundária (Tabela 8).

Os dados de campo possuem maior confiabilidade, porém quando difíceis ou impossíveis de serem obtidos, se utiliza os dados calculados ou adquiridos.

Tabela 6 – Informações sobre os Dados de Campo

Dado	Equipamento
Perfil hidráulico dos rios	Haste numerada e trena
Vazão de escoamento básico	Flowtracker Sontek
Pontos topográficos	GPS de precisão Trimble

Tabela 7 - Informações sobre os Dados Calculados

Dado	Método
Série histórica de chuva para bacia de estudo	Método de Thiessen
Chuva de projeto	Equação de i-d-f e Método de Huff
Tempo de concentração	Fórmula de Ven te Chow
Coefficiente de armazenamento	Proposição de Dooge (1973)
Vazões das BCs	HEC-HMS 3.5
Número de Deflúvio	USDA (1986) e Uso do solo
Manning	Observações em campo e Proposição de Cowan (1956)
Vazão de escoamento básico	Métodos estatísticos com as séries temporais de chuva e vazão

Tabela 8 - Informações sobre os Dados Adquiridos

Dado	Fonte
Séries históricas de chuva	ANA (2010) Estação 2648001 09/1927 até 12/2006 Estação 2648002 01/1941 até 12/2006
Série histórica de vazão	ANA (2010) Estação 83880000 04/1929 até 10/2004
Mapa topográfico	IBGE (2010) Gaspar 28823/ Escala 1:50.000
Mapa hidrológico	IBGE (2010) Gaspar 28823/ Escala 1:50.000
Uso do solo	Lima <i>et al.</i> (2010)

3.3 PRECIPITAÇÃO DE PROJETO

Com as estações pluviométricas disponíveis no Hidroweb, portal da ANA que armazena os dados pluviométricos, utilizou-se o Método de Thiessen para verificar a área de influência de cada estação nas proximidades da bacia do Braço do Baú. Observou-se que apenas três estações (códigos: 02648000, 02648001 e 02648002) influenciavam a área de estudo por este método. Destas três, a estação 02648000 participava de menos do que 7% da área total de contribuição, além de ter a menor quantidade de dados armazenados, os dados não serem consistidos e não estar mais em operação. Optou-se então em descartar essa estação e utilizar apenas as outras duas para este estudo. Em ambas foram encontradas falhas nos dados. Todas as falhas destas estações foram preenchidas através do Método da Distância Inversa com estas e as estações vizinhas (02648019, 02648024, 0269007, 02649010 e 02748000) (Tabela 9). Com as falhas preenchidas foi criada uma única série histórica referente à bacia de estudo com as estações 02648001 e 02648002 através do Método de Thiessen.

Através dessa nova série histórica, utilizou-se o Método de Gumbel para analisar a distribuição de extremos e estimar as máximas precipitações diárias prováveis para cada ano. Sequencialmente, o método de desagregação proposto pela DAEE/CETESB (1980) foi utilizado para se adquirir as precipitações com diferentes durações e de diferentes intensidades. Com esses procedimentos foram criadas as curvas de i-d-f para períodos de retorno de 2, 4, 5, 8, 10, 15, 20, 25, 40, 50, 75 e 100 anos.

O presente trabalho utilizou apenas os períodos de retorno de 5, 20, 50 e 100 anos, que serão utilizados para identificar as áreas inundadas. Na distribuição temporal da precipitação optou-se em utilizar o quarto quartil do Método de Huff. O quarto quartil foi o escolhido por fornecer um resultado de inundação mais grave do que os outros quartis pelas considerações de Monteiro & Kobiyama (2011) que afirmam que quanto mais tardar o pico do hietograma ocorrer, maior será a vazão de pico que este fornecerá e consequentemente maior sua importância em inundações.

Tabela 9 - Características das Estações Pluviométricas

Código	02648000	02648001	02648002	02648019	02648024	0269007	02649010	02748000
Nome	GASPAR	ILHOTA - JUSANTE	LUIZ ALVES	PIÇARRAS	ITAJAÍ	BLUMENAU	ITOUPAVA CENTRAL	BRUSQUE
Código Adicional	-	-	-	-	183	ANA	-	ANA
Bacia	ATLÂNTICO, TRECHO SUDESTE (8)							
Subbacia	RIO ITAJAÍ-AÇU (83)			RIO NHUNDIAQUARA (82)	RIO ITAJAÍ-AÇU (83)			
Estado	SANTA CATARINA							
Município	GASPAR	ILHOTA	LUIZ ALVES	PIÇARRAS	ITAJAÍ	BLUMENAU	BLUMENAU	BRUSQUE
Responsável	ANA	ANA	ANA	ANA	EPAGRI	ANA	ANA	ANA
Operadora	DESATIVADA	EPAGRI	EPAGRI	EPAGRI	EPAGRI	EPAGRI	EPAGRI	EPAGRI
Latitude	-26:55:0	-26:55:18	-26:43:27	-26:45:18	-26:57:1	-26:55:5	-26:47:35	-27:6:2
Longitude	-48:57:0	-48:50:21	-48:55:54	-48:41:58	-48:45:41	-49:3:55	-49:5:0	-48:55:4
Altitude (m)	11	10	90	10	5	12	65	40

FONTE: ANA (2010)

O tempo da duração da precipitação deve ser o tempo de duração crítica, ou seja, o que causará a maior vazão de pico. De acordo com as considerações de Tucci (1995), para estudos complexos de hidrologia, a duração crítica deve ser pesquisada, pois será diferente do tempo de concentração, como proposto pelo Método Racional. A fórmula de Ven te Chow adaptada pela MOPU (1987) foi utilizada para o cálculo do tempo de concentração da bacia, levando em conta as considerações de Silveira (2005) sobre as características de bacias para a utilização de fórmulas de tempo de concentração.

Através de tentativas, partindo do tempo de concentração da bacia de estudo de aproximadamente 5 horas, foram realizadas simulações com durações de 4 e 6 horas no modelo hidrológico. Estas simulações foram realizadas apenas para a maior bacia de contribuição, a BC09. Foram então verificadas duas considerações, do maior volume e vazão de pico produzidos por estas simulações, como proposto por Tucci (1995). O maior valor obtido para ambas as considerações foi o tempo de duração de 6 horas. Desta forma simulações foram realizadas acrescentando uma hora ao tempo de duração da chuva até que pelo menos uma das considerações, de volume ou vazão de pico, fossem menor do que o calculado anteriormente. A duração da precipitação que forneceu a maior vazão de pico foi o de 15 horas e desta forma foi o tempo de duração crítica da precipitação utilizado neste trabalho.

3.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA COM HEC-HMS

A modelagem hidrológica foi realizada, utilizando os modelos e os parâmetros referenciados na Tabela 10. O valor do Número de Deflúvio (Curve Number) foi obtido através do auxílio dos estudos de Lima *et al.* (2010) que realizaram a discriminação do uso do solo para a área do Braço do Baú. Já as perdas iniciais de precipitação foram obtidas de acordo com o que o USDA (1971) sugere para Modelo de Retenção Potencial Máxima em áreas rurais

$$I_a = 0,2 \cdot S \dots\dots\dots(15)$$

$$S = \frac{25400 - 254 \cdot CN}{CN} \dots\dots\dots(16)$$

onde Ia é a perda inicial em milímetros; S é a capacidade de retenção de água no solo em milímetros; e CN é o número de deflúvio. O valor da impenetrabilidade foi utilizado apenas como parâmetro de calibração.

O coeficiente de armazenamento foi estimado através da proposição de Dooge (1973):

$$K = 80,7 \cdot A^{0,23} \cdot J^{-0,70} \dots\dots\dots(17)$$

onde K é a constante de armazenamento do reservatório linear em horas; A é a área da bacia em km^2 ; e J é a declividade média dos rios das bacias em partes por 10.000.

As vazões de base foram obtidas através do Método de Regionalização de Vazões proposto por Tucci (1995) utilizando a bacia vizinha, de Luiz Alves. O Método de Regionalização estima a vazão de um corpo hídrico de uma bacia hidrográfica a partir das bacias hidrográficas vizinhas, as quais os valores de vazão são conhecidos. Para se obter a vazão de base da qual pudesse ser regionalizada se criou, através do banco de dados da ANA, uma estimativa da vazão básica mensal para a bacia de Luiz Alves através da média das vazões dos dias em que não ocorreram precipitações.

Tabela 10 - Estrutura do HEC-HMS

Modelo	Método utilizado	Parâmetros
Modelo de Perdas de Precipitação	Modelo da Retenção Potencial Máxima - <i>SCS</i> <i>Curve Number</i>	Precipitação de projeto; Número de Deflúvio; Perdas Iniciais; Áreas impenetráveis;
Modelo da Transformação do Escoamento Superficial	Método do Hidrograma Unitário de Clark	Precipitação efetiva; Área da bacia; Tempo de concentração; Coeficiente de armazenamento (Tabela 11)
Modelo de Escoamento Básico	Constante Mensalmente	Vazão do escoamento de base mensal

Tabela 11- Dados utilizados para o Método do Hidrograma Unitário de Clark

Bacia	Área	Tempo de Concentração	Coefficiente de Armazenamento
-	km ²	horas	horas
BC1	0,399	0,32	0,56
BC2	0,16	0,19	0,33
BC3	1,555	0,52	0,74
BC4	1,249	0,43	0,55
BC5	0,867	0,47	0,84
BC6	0,885	0,54	1,13
BC7	4,196	0,90	1,32
BC8	0,534	0,31	0,46
BC9	9,961	1,24	1,56
BC10	4,123	0,69	0,76
BC11	1,962	0,54	0,70
BC12	0,547	0,41	0,80
BC13	3,279	0,98	1,84
BC14	0,302	0,31	0,63
BC15	2,948	0,74	1,06
BC16	0,227	0,23	0,41
Luiz Alves	102,58	4,78	24,35

As vazões regionalizadas foram validadas com dados obtidos em campo em um dia não chuvoso do mês de outubro de 2011 com o equipamento Flowtracker. Apenas as vazões de duas seções foram medidas em campo (Figura 8). Essas medições foram utilizadas para verificar a coerência dos métodos do cálculo da vazão básica utilizados. Ambas as medições forneceram resultados de 0,25 m³/s maiores do que os calculados. Desta forma decidiu-se aumentar o valor de dos escoamentos básicos calculados das subbacias de contribuição 9 e 10 em 0,125 m³/s, pois através destas medições, pode-se deduzir que foram as

influências no canal a montante do ponto de medição 1 que foram as responsáveis pela diferença da vazão medida e calculada.

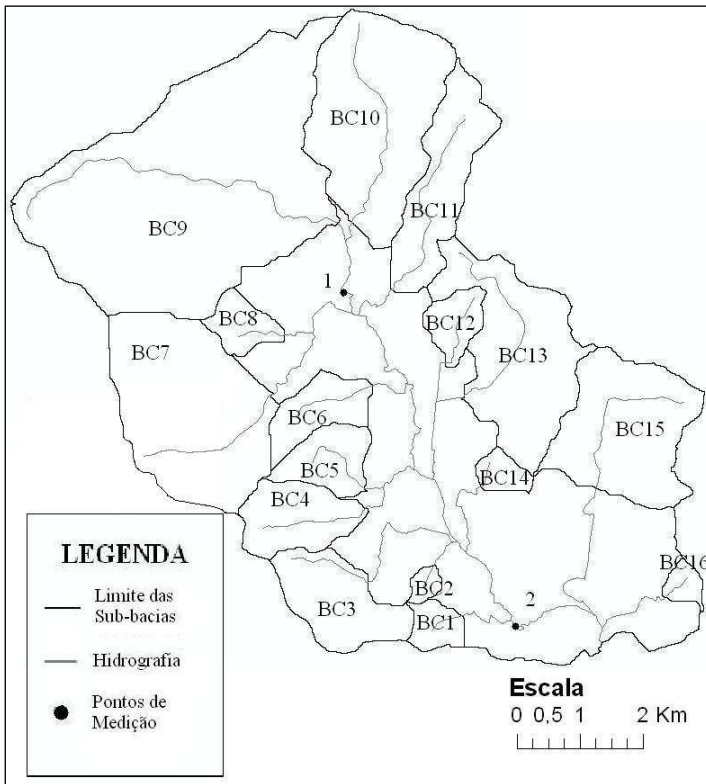


Figura 8 - Localização dos Pontos de Medição

A calibração do modelo foi realizada apenas para a bacia de Luiz Alves, a qual teve seus parâmetros de entrada calculados de forma semelhante do que a bacia de estudo. Esta medida foi necessária porque apenas esta bacia possuía dados de vazões observadas. Foram variados na calibração somente os parâmetros do modelo de perda, pois os valores destes parâmetros foram considerados iguais para todas as bacias deste estudo, sendo possível a utilização dos valores calibrados nas subbacias de contribuição. A calibração foi realizada de forma manual através da relação dos hidrogramas calculados e observados.

3.5 MODELAGEM HIDRODINÂMICA COM FLO-2D

No modelo hidrodinâmico, os parâmetros de entrada foram os pontos de elevação retirados do mapa topográfico e aperfeiçoados com pontos coletados em campo, informações hidrográficas como perfis transversais e longitudinais dos rios, assim como suas trajetórias nas bacias. Além disso, foram utilizadas as informações dos hidrogramas das subbacias obtidos através da modelagem hidrológica, as próprias precipitações que causaram estas vazões, as informações referentes ao uso do solo e seu nível de saturação e o coeficiente de Manning do canal e da planície de inundação. O modelo adotado para estimar a infiltração na modelagem hidrodinâmica foi o Modelo da Retenção Potencial Máxima, igual ao caso da modelagem hidrológica.

Para a modelagem 2D sempre é necessário criar as condições de contorno e definir o local de entrada e saída de massa do sistema. Também é necessário definir o tamanho do grid que está diretamente relacionado à escala do mapa topográfico. Pode-se definir o tamanho do grid como o tamanho mínimo do pixel do mapa topográfico utilizado. Para mapas com escala de 1:50.000 é aconselhado utilizar pixels mínimos de 20 metros ou seja, 400 m². Detalhes como pontes, estradas e construções foram desconsiderados na modelagem por causa da limitação do próprio, pois a área de estudo é muito grande para fornecer resultados adequados com excessos de detalhes nos dados de entrada.

Os parâmetros variados na calibrados foram o número de Manning e o perfil transversal dos canais. Através de conversas com diversos moradores da localidade, estes afirmaram que na inundação de 2008 praticamente todos os rios foram assoreados devido aos diversos deslizamentos que ocorreram. Desta forma, foram realizadas simulações com os perfis transversais dos rios e sem eles, somente utilizando os talvegues topográficos (Figura 9).

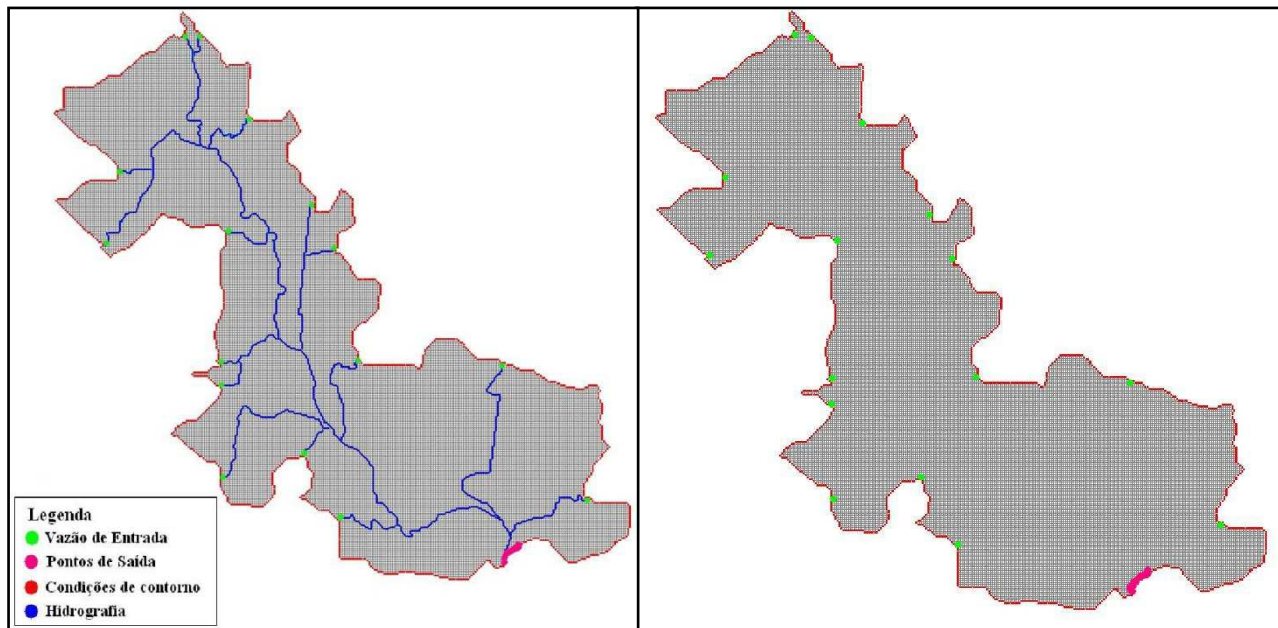


Figura 9 - Configuração da modelagem 2D com e sem os perfis dos rios

A Figura 10 representa o fluxograma de todo o processo de modelagem do presente trabalho. A validação do modelo não foi realizada pela dificuldade de adquirir dados de outro evento extremo.

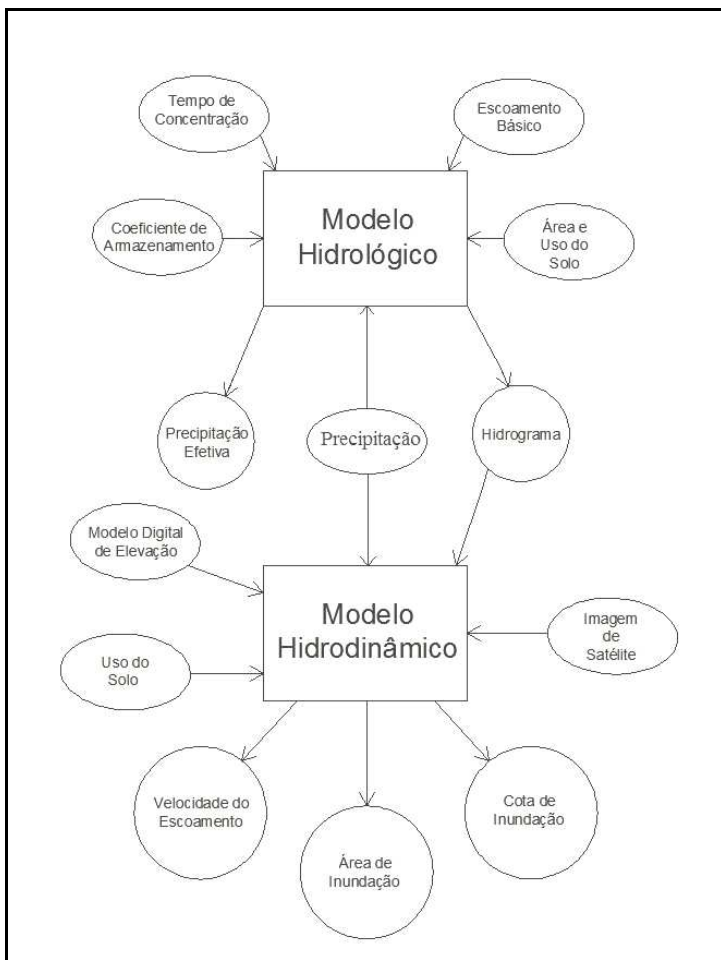


Figura 10 - Fluxograma de modelagem conjunto de modelos hidrológico e hidrodinâmico.

3.6 MAPA DE INUNDAÇÃO, ÍNDICE DE PERIGO E MAPA DE PERIGO

Para mapear as áreas de perigo foi utilizado o Índice de Perigo proposto por Stephenson (2002) e as considerações do projeto PREVENE (2001). Desta forma, o perigo da inundação é função unicamente da profundidade da lâmina de água e de sua velocidade. O mapa de perigo foi criado para os períodos de retorno de 5, 20 e 100 anos. A intensidade (Índice de Perigo) é de 0,1 a 0,5 m²/s para a baixa, 0,5 a 1,0 m²/s para a média e mais do que 1,0 m²/s para a alta.

Como é inviável a segurança máxima para todos os moradores e atividades, devem-se criar um mapa com diferentes probabilidades de ocorrência do perigo e definir atividades pertinentes a cada situação. O mapa de perigo deve ser utilizado no plano diretor do município para definir quais atividades podem ocupar determinadas áreas.

Para a localização de vias de transporte não se deve adotar nenhum perigo como aceitável, pois em casos de desastres naturais estas devem estar sempre disponíveis para a retirada de pessoas. Para a localização de obras de importância pública, como hospitais e escolas, deve-se ter pelo menos o perigo baixo como aceitável. Obras como parques para lazer que são utilizadas apenas quando não existe ocorrência da precipitação podem ser construídas aceitando o perigo alto, desde que após um evento de inundação estes locais sejam limpos. As demais obras devem ser realizadas aceitando o perigo médio, mas sempre tentando reduzir este ao máximo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 EQUAÇÃO DE CHUVAS INTENSAS PARA A ÁREA DE ESTUDO

As curvas i-d-f foram utilizadas na criação da seguinte Equação de Precipitações Intensas:

$$i = \frac{863,92 \cdot T^{0,191}}{(10,3 + t)^{0,745}} \dots\dots\dots (18)$$

onde i é a intensidade em mm/h; T é o período de retorno em anos; e t é a duração do evento chuvoso em minutos.

O coeficiente correlação entre a curva de chuvas intensas e a equação de chuvas intensas foi de 0,999, o que confere o ajuste adequado da transformação. Outra forma de validação que pode ser feita desta equação são os valores dos coeficientes que são próximos aos considerados por Brutsaert (2005) que comenta que os valores dos coeficientes variam normalmente entre 0,15 a 0,5 para “m”, 5 a 10 min para “b” e 0,6 a 0,8 para “n”.

A equação de chuvas intensas que não varia espacialmente é válida quando não se possui uma distribuição espacial da precipitação ou quando esta sendo utilizado um modelo concentrado, utilizando então a altura pluviométrica idêntica para toda a área. Esse procedimento não é o ideal, pois não representa adequadamente a realidade. Para aperfeiçoar a qualidade destes dados, seria necessário criar uma precipitação de projeto com uma variação espacial, mas isso é possível apenas quando se possui monitoramento por satélites ou radares da região ou uma rede pluviométrica organizada para tal finalidade.

4.2 HIDROGRAMAS DE CONTRIBUIÇÃO PARA UMA ÁREA INUDÁVEL

Na calibração do modelo hidrológico se deu prioridade para a minimização dos erros relacionados à ascensão e ao pico dos hidrogramas. Na ascensão os resultados foram bons, nos picos regulares e na recessão ruins (Figura 11 e 12). De acordo com a metodologia descrita neste trabalho, os hidrogramas de contribuição foram gerados para os períodos de retorno de 5, 20, 50 e 100 anos (APÊNDICE A). Estes foram utilizados na modelagem hidrodinâmica como dados de entrada do sistema.

Para a análise da variação dos hidrogramas com os diferentes períodos de retorno apenas três subbacias representativas do conjunto total foram contempladas, isto é, BC2, BC9 e BC11. Foram escolhidos BC2 por ser a menor bacia, BC9 por ser a maior bacia e BC11 por ser uma bacia com área mediana. As comparações realizadas foram para uma mesma subbacia, ou seja, não foram feitas comparações entre subbacias diferentes. Foram verificadas unicamente as variações dos resultados em função dos diferentes períodos de retorno. Os itens analisados foram o volume total do hidrogramas e a vazão de pico (Tabelas 12 e 13).

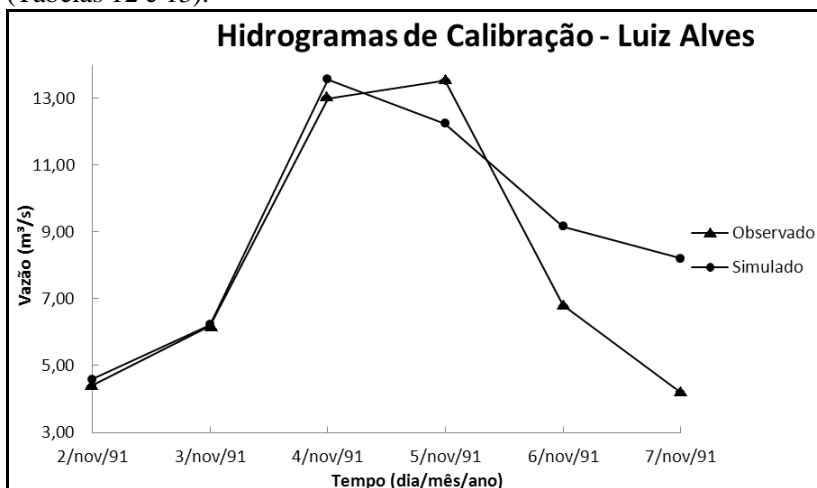


Figura 11 - Hidrogramas de Calibração de Luiz Alves

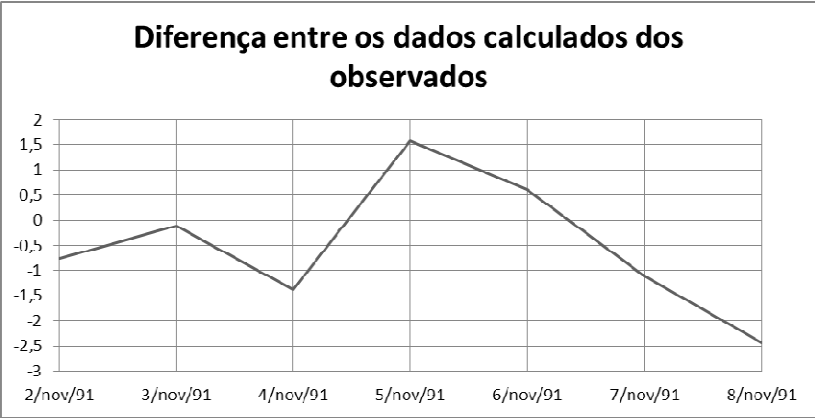


Figura 12 - Diferença dos dados calculados dos observados para a bacia de Luiz Alves

Tabela 12 - Comparação dos volumes totais

Volume total (m³)					
	Período de Retorno (anos)				Diferença de 5 a 100 anos (%)
	5	20	50	100	
BC2	13	19	25	31	145
BC9	326	488	642	788	142
BC11	63	94	125	154	146

Tabela 13 - Comparação das vazões de pico

Vazão de Pico (m³/s)					
	Período de Retorno (anos)				Diferença de 5 a 100 anos (%)
	5	20	50	100	
BC2	0,4	0,6	0,9	1,1	159
BC9	16,7	26,3	35,2	43,7	162
BC11	4,4	6,9	9,2	11,4	161

Através destas comparações podemos identificar como principais pontos a grande variação do volume total e da vazão de pico, sendo que estes dois itens possuem variação muito parecida de cerca de 150%. As variações desprezíveis dos tempos em que as vazões de pico ocorrem necessitam serem analisadas mais profundamente. Neste estudo, o período de retorno variou apenas a intensidade das precipitações de projeto, porém este período de retorno pode modificar outros dados e esta influência não foi considerada.

Alguns dos dados que podem ser modificados pelo período de retorno são: a duração da chuva crítica; o tempo de concentração da bacia; e o coeficiente de armazenamento. Mesmo que as formulações utilizadas para calcular o tempo de concentração e coeficiente de armazenamento não utilizam o parâmetro da intensidade da precipitação, não significa que esta intensidade não influencie fora da modelagem, já que existem outras formulações que levam em conta a intensidade da precipitação.

4.3 IDENTIFICAÇÃO, DETALHAMENTO E COMPARAÇÃO DAS ÁREAS INUNDADAS

O modelo hidrodinâmico foi calibrado a partir do evento extremo de novembro de 2008. Em campo, com um GPS de precisão foram coletados 12 pontos geográficos onde os moradores da localidade informaram ser o limite da inundação de novembro de 2008, ou seja, até onde a água chegou naquela inundação histórica (Figura 13). Para estes pontos a cota de inundação é nula, porém representa o início da mancha de inundação. Desta forma, foram feitas simulações para verificar qual a proximidade da mancha de inundação simulada dos pontos coletados (Figura 14). A mancha de inundação que melhor se ajustou aos pontos coletados foi a produzida pela simulação sem os perfis transversais, a qual então foi utilizada para a criação dos mapas de inundação.

As áreas inundadas foram identificadas e detalhadas através da ferramenta FLO-2D Mapper, que faz parte do pacote do próprio software FLO-2D. Para uma área ser considerada inundada é necessário que em alguma parte da simulação do modelo hidrodinâmica, o grid possuísse uma profundidade de lâmina de água maior ou igual a três centímetros. As Figuras 15, 16, 17 e 18 ilustram as áreas inundadas detalhadas para os períodos de retorno de 5, 20, 50 e 100 anos.



Figura 13 - Medição com GPS de precisão

A comparação das áreas inundadas foi realizada através de dois parâmetros, a área máxima inundada e o volume máximo armazenado (Tabela 14). Os principais pontos que chamam atenção nesta análise são a baixa variação da área inundada, como é possível ver pela comparação das figuras, e a alta variação do volume de inundação. Desta forma, observando apenas a área inundada, as vazões das subbacias de concentração, em função do período de retorno, não demonstram grande importância para as inundações na área de estudo, porém se observarmos o volume, esta hipótese é contrária. Uma das hipóteses para este comportamento distinto de ambos os parâmetros é a característica geomorfológica observada na própria bacia. Esta bacia possui uma pequena área plana, onde o alagamento é possível e existem muitas áreas declivosas onde não é possível. Este efeito pode ter sido superestimado pelo mapa topográfico utilizado que é antigo e de baixa resolução.

Apenas a área inundada e o volume da inundação não fornecem informações suficientes para a criação de mapas de perigo. Desta forma, viu-se necessário para este trabalho uma análise mais apurada a fim de verificar o perigo que estas inundações possuem.

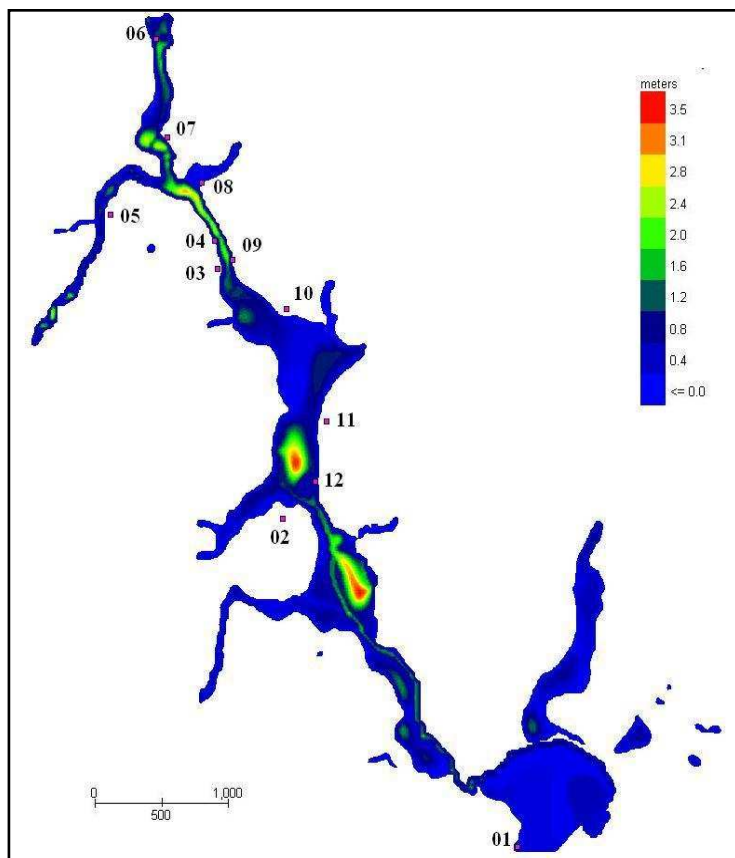


Figura 14 - Análise das áreas inundadas

Tabela 14 - Calibração do FLO-2D

Período de Retorno	Área Máxima Inundada (AMI)	Volume Máximo de Inundação (VMI)	Diferença para a AMI de TR 5	Diferença para o VMI de TR 5
<i>anos</i>	<i>m²</i>	<i>m³</i>	<i>%</i>	<i>%</i>
5	2.890.400	1.572.112	-	-
20	3.082.800	2.191.556	7	39
50	3.210.800	2.698.792	11	72
100	3.308.400	3.147.212	14	100

Mapa de Inundação - Período de Retorno de 5 anos

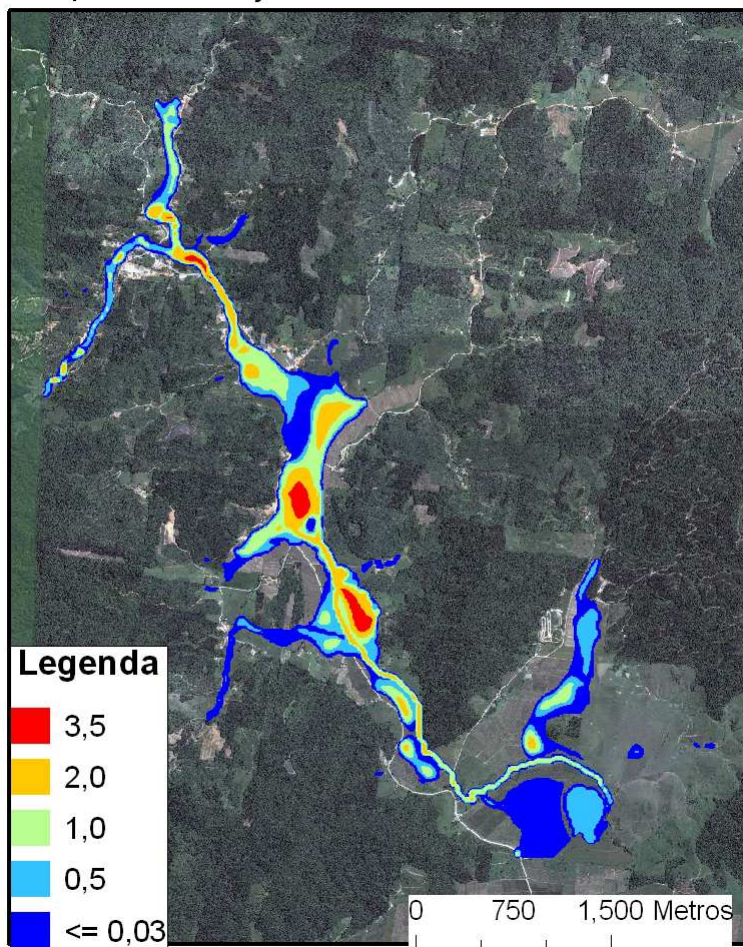


Figura 15 - Mapa de Inundação - Período de Retorno de 5 anos

Mapa de Inundação - Período de Retorno de 20 anos

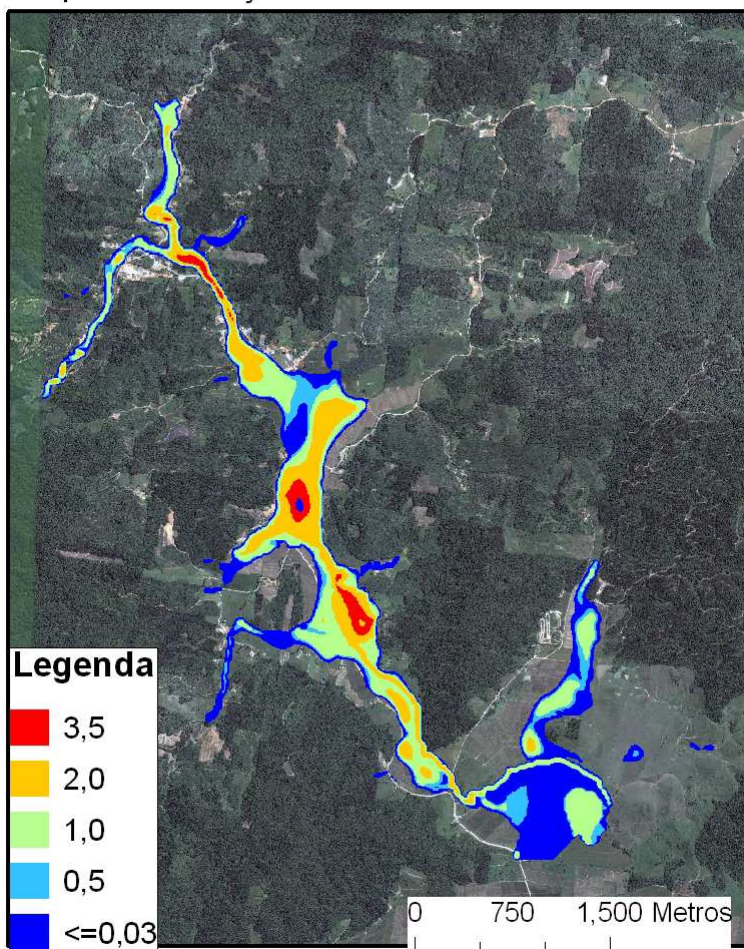


Figura 16 - Mapa de Inundação - Período de Retorno de 20 anos

Mapa de Inundação - Período de Retorno de 50 anos

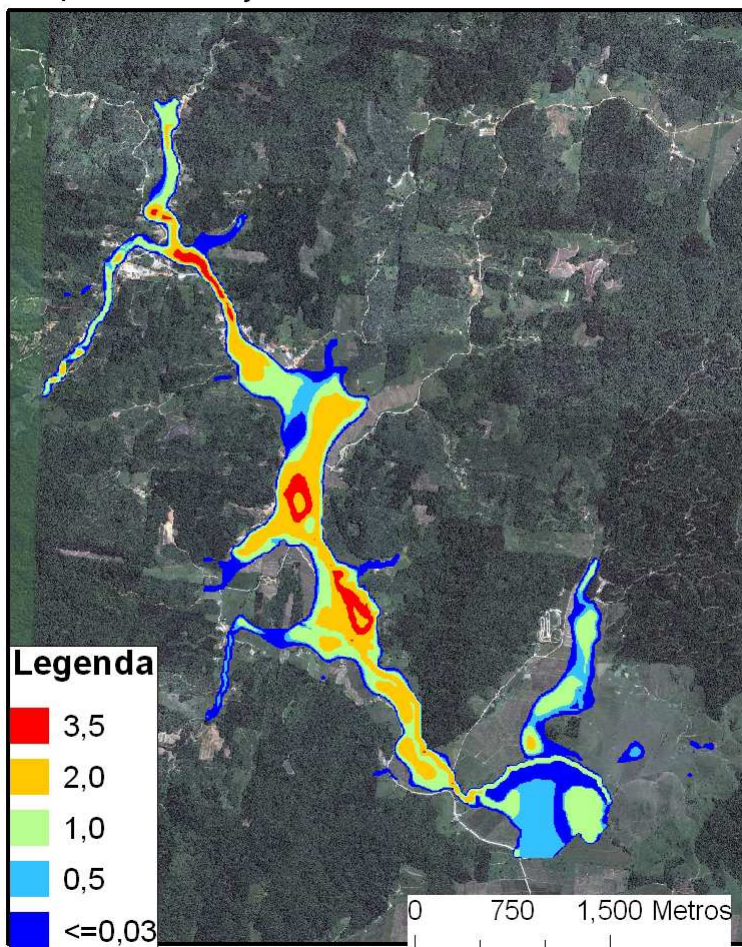


Figura 17 - Mapa de Inundação - Período de Retorno de 50 anos

Mapa de Inundação - Período de Retorno de 100 anos

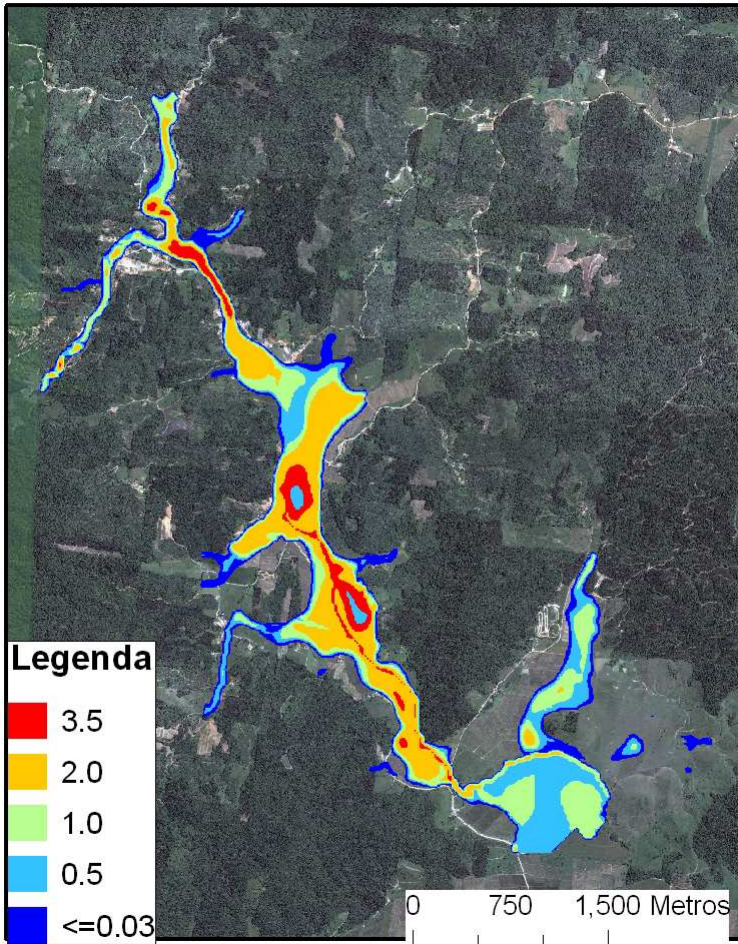


Figura 18 - Mapa de Inundação - Período de Retorno de 100 anos

4.4 MAPEAMENTO DAS ÁREAS DE PERIGO DE INUNDAÇÃO

Este é o produto final deste presente trabalho. O mapa de perigo foi criado com o auxílio da ferramenta Mapper FLO2-D (Figura 19). Os níveis de perigo são identificados da seguinte maneira: 3 para Perigo Alto (vermelho); 2 para Perigo Médio (laranja); 1 para Perigo Pequeno (amarelo) e 0 para Perigo Inexistente (sem cor). Para verificar a importância do corpo hídrico as áreas de perigo de inundação são apresentadas na Figura 20.

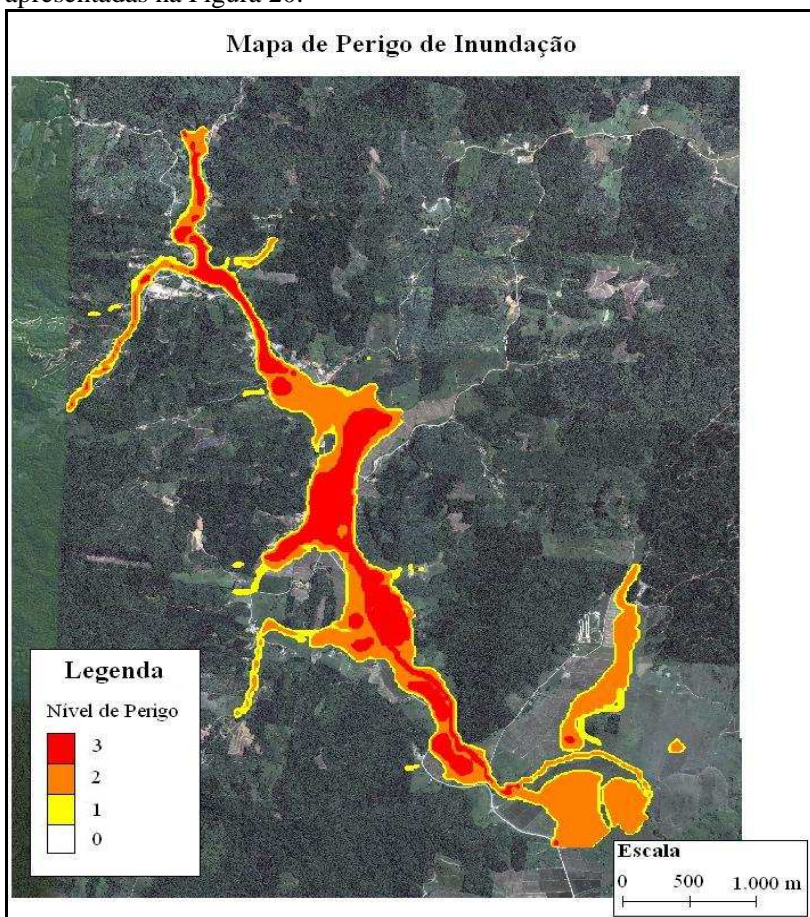


Figura 19 - Mapa de Perigo de Inundação

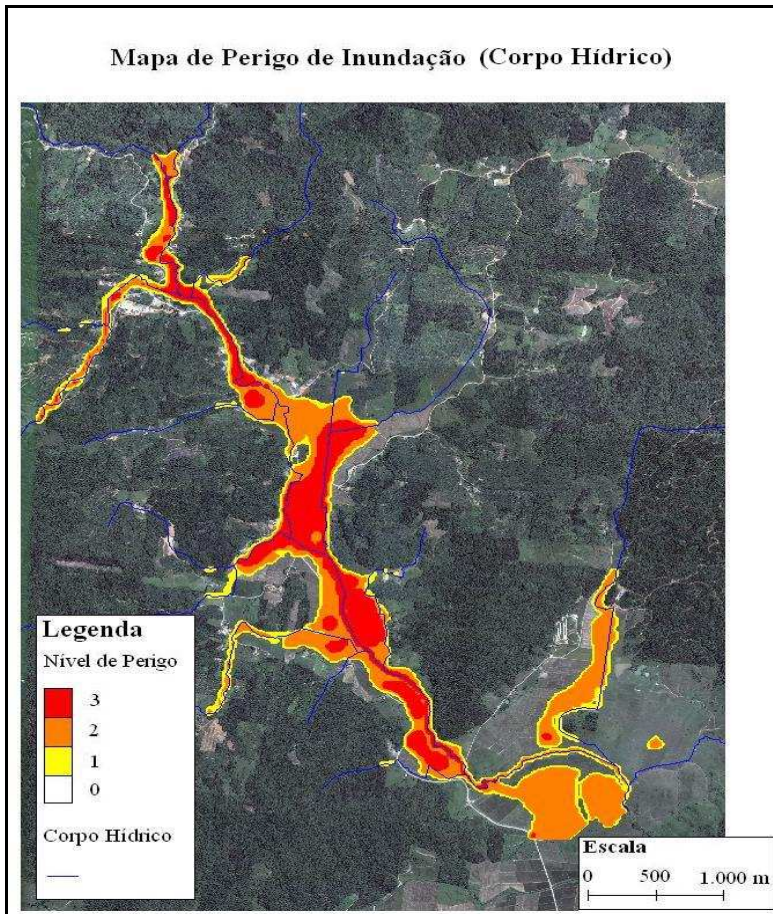


Figura 20 - Mapa de Perigo de Inundação (Corpo Hídrico)

Através a análise destas figuras, observa-se que as subbacias de contribuição, BC1, BC2, BC5, BC6, BC8, BC12, BC14 e 16 possuem uma participação muito pequena na questão na área do mapeamento de perigo. Estas subbacias citadas são as únicas que possuem a vazão de contribuição de pico menor do que $2 \text{ m}^3/\text{s}$ para o período de retorno de 5 anos e menor do que $5 \text{ m}^3/\text{s}$ para o período de retorno de 100 anos. A consideração da baixa importância dessas subbacias despreza o efeito da sinergia das vazões de contribuição das subbacias e para se tirar mais conclusões seria necessária a comparação da modelagem com e sem estas bacias.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho mapeou as áreas de perigo de inundação na Bacia do Braço do Baú, no município de Ilhota – SC. Para isso foram: determinada a equação de chuvas intensas, gerados hidrogramas de contribuição para a área inundável delimitada, detalhada a área inundável e então estruturado um mapa de perigo em função de diferentes períodos de retorno de precipitação e intensidades de perigo.

A equação de chuvas intensas foi criada a partir dos dados das estações pluviométricas da ANA utilizando a distribuição de máximo de Gumbel e o Método de Desagregação da DAEE/CETESB (1980). O coeficiente de correlação entre a curva i-d-f e a equação de chuvas intensas foi de 0,999.

Os hidrogramas gerados tiveram uma variação do volume total e da vazão de pico de cerca de 150%. Estas considerações comparando as precipitações com TR de 5 e 100 anos para as mesmas subbacias.

Também considerando a comparação das precipitações com TR de 5 e 100 anos, a variação da AMI foi de 14% e variação a do VMI de 100% de 5 a 100 anos. Ou seja, a variação da profundidade da lâmina de água foi mais expressiva do que a da área inundada.

A criação de mapas de perigo com a maior exatidão possível é sempre válida. Isto se deve principalmente pela utilização destes mapas em outros trabalhos. No caso da criação de um sistema de alerta, um mapa de perigo superestimado faz com que o sistema de alerta perca a confiabilidade toda vez que for ativado de forma errada. Em medidas estruturais, o superdimensionamento do mapa de perigo pode elevar desnecessariamente o preço da obra, inviabilizando a construção desta.

Tendo em vista estas considerações, recomendam-se os seguintes itens para futuros trabalhos:

- Medir a precipitação distribuída espacialmente para a área através de rede de estações pluviométricas, satélites ou radares. Esta medida é necessária para as simulações dos modelos se aproximarem mais da realidade;
- Instalar estações pluviográficas para ser possível calibrar e validar a distribuição temporal utilizada neste trabalho, no caso, a distribuição do 4º quartil de Huff. Com estas estações a própria equação de chuvas intensas pode também ser aperfeiçoada;

- Instalar estações fluviométricas no Braço do Baú. Estas estações são muito importantes para a independência do estudo da regionalização das vazões que acarreta em um grande erro pela quantidade de informações disponíveis. Esta medida afeta principalmente na calibração e validação do modelo chuva e vazão, mas pode ser útil também diretamente no modelo hidrodinâmico;
- Os modelos e parâmetros utilizados no cálculo da chuva-vazão devem ser revistos, pois as recessões dos hidrogramas gerados neste estudo não estão satisfatórias de acordo com a calibração;
- Variar mais parâmetros em função do período de retorno da precipitação e não apenas a intensidade da precipitação de projeto;
- Adquirir mapas topográficos mais atuais e de melhor resolução espacial;
- Na modelagem hidrodinâmica, a área inundável pode ser subdividida, obtendo resultados mais apurados na simulação, calibração e validação;
- Criar mapas de inundação para os próximos eventos extremos, na área do Braço do Baú. Desta forma é possível calibrar e validar o modelo hidrodinâmico adequadamente;
- Verificar a importância na determinação da área de perigo das subbacias de contribuição menores. Caso alguma delas puder ser desconsiderada tanto o tempo de modelagem quanto o tempo de simulação serão reduzidos;

Para a finalização adequada deste trabalho é necessário a aplicação de todas as informações e conhecimentos gerados por este, principalmente dos mapas gerados. Desta forma, este tem de ser apresentado para a prefeitura do município de Ilhota - SC e verificar a possibilidade de aperfeiçoamento e aplicação. O aperfeiçoamento feito como descrito nesta conclusão.

REFERÊNCIAS

ANA – AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Hidroweb. Disponível em [<http://hidroweb.ana.gov.br>], acesso em julho de 2010.

BARTH, F. T.; POMPEU, C. T.; FILL, H. D.; TUCCI, C. E. M.; KELMAN, J.; BRAGA Jr.; B. P. F. Modelos para gerenciamento de recursos hídricos. São Paulo: Nobel: ABRH, 526 p., 1987.

*BERNARD, M. M. Formulas for rainfall intensities of long duration. Trans. Amer. Soc. Civil Eng., 96, 592-606, 617-624, 1932.

*BELL, F. C. Generalized Rainfall Depth-Duration-Frequency Relationships. Journal of the Hydraulics Division, Asce, Vol. 95, Nº HY1, 311-327, 1969

BRUTSAERT, W. Hydrology: An Introduction. Cambridge University Press. p.605, 2005.

CANHOLI, A. P. Drenagem Urbana e Controle de Enchentes. São Paulo - SP: Oficina de Textos, 302 p., 2005.

CASTRO, A. L. C.; CALHEIROS, L. B.; CUNHA, M. I. R.; BRINGEL, M. L. N. C. Manual de Desastres: desastres naturais. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2007. 182 p.

CHEN, K.; MCANENEY, J.; BLONG, R.; LEIGH R.; HUNTER, L.; MAGILL, C. Defining area at risk and its effect in catastrophe loss estimation: a dasymetric mapping approach. Applied Geography, v.24, 2004. p. 97-117.

CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia. São Paulo, Edgar Blücher, 2ª edição, 1980.

*COWAN, W. L. Estimating hydraulic roughness coefficients: Agricultural Engineering, v. 37, no. 7, p. 473-475, 1956

DAEE/CETESB. Drenagem Urbana. Segunda Edição, São Paulo (SP), 1980.

DOOGE, J. C. I. Linear theory of hydrologic systems. Tech. Bull. Nº 1468. Agricultural Research , U. S. Dept. of Agriculture, Washington, D. C., 1973.

EM-DAT. The OFDA/CRED International Disaster Database. [on line] <<http://www.em-dat.net/>>. Visitado em 24 de maio. 2011.

FLO-2D SOFTWARE INC. Reference Manual / GDS Manual / Data Input Manual / Mapper Manual. Tutoriais do modelo FLO-2D. Version 2009. 2009.

FRANK, B.; SEVEGNANI, L. Desastre de 2008 no Vale do Itajaí. Água, gente e política. Agência de Água do Vale do Itajaí, Blumenau – SC, 192 p., 2009.

*GREENBERGER, M.; CRENSON, M.; CRISSEY, B. Models in the policy process. New York: Russell Sage Foundation. 1976.

GOERL, R. F. Estudo de inundações em Rio Negrinho - SC sob a ótica dos desastres naturais. Florianópolis: UFSC/CFH/GCN, 2010. 103f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina.

HUFF, F. A. Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms. Water Resources Research, Illinois State Water Survey, Urbana 3(4). 1007-1019, 1967.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE Cidades – Gaspar. Disponível em [www.ibge.gov.br], acesso em junho de 2010.

KOBIYAMA, M.; SILVA, R.V.; CHECCHIA, T.; ALVES, A. POMPÊO, C.A. Papel da engenharia ambiental para prevenção de desastres naturais: Monitoramento e modelagem. In: Encontro Nacional dos Estudantes de Engenharia Ambiental, 1., 2003, Goiânia. Anais. Goiânia: Universidade Católica de Goiás, 2004a. p.23 – 24.

KOBIYAMA, M.; CHECCHIA, T.; SILVA, R. V.; SCHRÖDER, P. H.; GRANDO, A. REGINATTO, G. M. P. Papel da comunidade e da universidade no gerenciamento de desastres naturais. In: Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, 1., Florianópolis. Anais... Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004b. p. 834-846, 2004.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D.A.; MARCELINO, I.P.V.O.; MARCELINO, E.V.; GONÇALVES, E.F.; BRAZETTI, L.L.P.; GOERL, R.F.; MOLLERI, G.; RUDORFF, F. Prevenção de desastres naturais: Conceitos básicos. Curitiba: Organic Trading. 109 p., 2006.

KOBIYAMA, M.; MONTEIRO, L.R.; MICHEL, G.P. Aprender Hidrologia para Prevenção de Desastres Naturais. In: 28º Seminário de Extensão Universitária da Região Sul. Florianópolis: UDESC. Anais, 2010. 6p.

LIMA, G.M.A.; BASTOS, L.C.; BELTRAME, A.V. Correlação entre o movimento de massa e a cobertura vegetal na bacia do Braço do Baú, Município de Ilhota – SC. In Anais do III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias de Geoinformação, Recife, Jul. 2010, pp. 001 - 008.

LOUKAS, A. Flood frequency estimation by a derived distribution procedure. Journal of Hydrology 255, pp. 69 – 89, 2002.

MACHADO, F. W. Modelagem Chuva-Vazão Mensal Utilizando Redes Neurais Artificiais. Dissertação. Universidade Federal do Paraná. 174 p., 2005.

MARCELINO, E.V., NUNES, L.H., KOBIYAMA, M. Banco de dados de desastres naturais: Análise de dados globais e regionais. Caminhos da Geografia (UFU. Online), Uberlândia, v.7, n.19, p.130 - 149, 2006

MENEZES, J.G.R. A tragédia do Morro do Baú. Nova Letra Gráfica e Editora, Blumenau – SC, 438 p., 2009.

*MEYER, A. F. The Elements of Hydrology. New York: John Wiley & Sons, Inc. p.149, 1917.

MONTEIRO, L. R.; KOBAYAMA, M. Influência da distribuição temporal da precipitação em inundações. In XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (2011: Maceió) Maceió: ABRH, Anais, 2011. CD-rom. 16p. (no prelo)

*MOPU Tecnologia Carreteras, Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos em pequenas cuencas naturales, Textos de la Direccion General de Carreteras, n 12, Espanha, 124 p. 1987.

NAGHNETTINI, M.; PINTO, E. J. A; Hidrologia Estatística. Belo Horizonte: CPRM, 600 p., 2007.

O'BRIEN, J.S.; JULIEN, P.Y.; FULLERTON, W.T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation. J. of Hyd. Eng., ASCE, 119(2), pp. 244 – 259, 1993.

PEREIRA, M. Ilhota, 23 de novembro de 2008: diário de uma tragédia. HB Editora, Blumenau – SC, 272 p., 2009.

PFAFSTETTER, O. Chuvas Intensas no Brasil. Departamento Nacional de Obras de Saneamento, Ministério do Interior, Rio de Janeiro, 1957.

*PREVENE. Contribution to “Natural” Disaster Prevention in Venezuela. Cooperation: Venezuela – Switzerland – PNUD. 2001.

RAHMAN, A.; WEINMANN, P.E.; HOANG, T.M.T; LAURENSEN, E.M. “Monte Carlo simulation of flood frequency curves from rainfall”. Journal of Hydrology 256, pp. 196 – 210, 2002.

*SHERMAN. C. W. Frequency and intensity of excessive rainfall at Boston, Massachusetts. Trans. Amer. Soc. Civil Eng., 95, 951-960, 966-968. 1931.

SILVEIRA, A.L.L. “Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 10, pp. 5 – 23, 2005.

SINGH, V. P. Elementary Hydrology. New Jersey: Prentice Hall, 973 p., 1992.

STEPHENSON, D. 2002. Integrated flood plain management strategy for the Vaal. Urban Water, 4, pp. 425-430

STRAHLER, A.N. Hypsometric (Area-altitude) analysis of erosional topography. Bull. G.S.A., 63, pp. 1117-1142, 1952.

*TAVARES, P. R. L.; CASTRO, M. A. H. de. Simulação de Perfis D'água e Planícies de Inundação Relacionados a Diferentes Cenários de Urbanização. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, 2005.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. Desastres Naturais: conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geológico, 196 p., 2009.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 1ª Ed, Porto Alegre: Edusp, 943p., 1993.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T.; Drenagem Urbana. 1ª Ed, Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 428p., 1995.

TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. 1ª Ed, Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 669p., 1998.

UNDP. Reducing Disaster Risk: a Challenge for Development. New York, 2004

USACE-HEC. Hydrologic Modeling System, HEC-HMS – Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. 157 p., 2000.

USACE-HEC. Hydrologic Modeling System, HEC-HMS v3.5 – User’s Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 318 p., 2010.

USDA. Urban hydrology for small watersheds, Technical Release 55. Soil Conservation Service, Washington, 1986.

*USDA. Soil Conservation Service National engineering handbook, Section 4:Hydrology. Springfield, VA, 1971.

* Bibliografias não consultadas diretamente

APÊNDICE A – Hidrogramas de projeto para 5, 20, 50 e 100 anos.

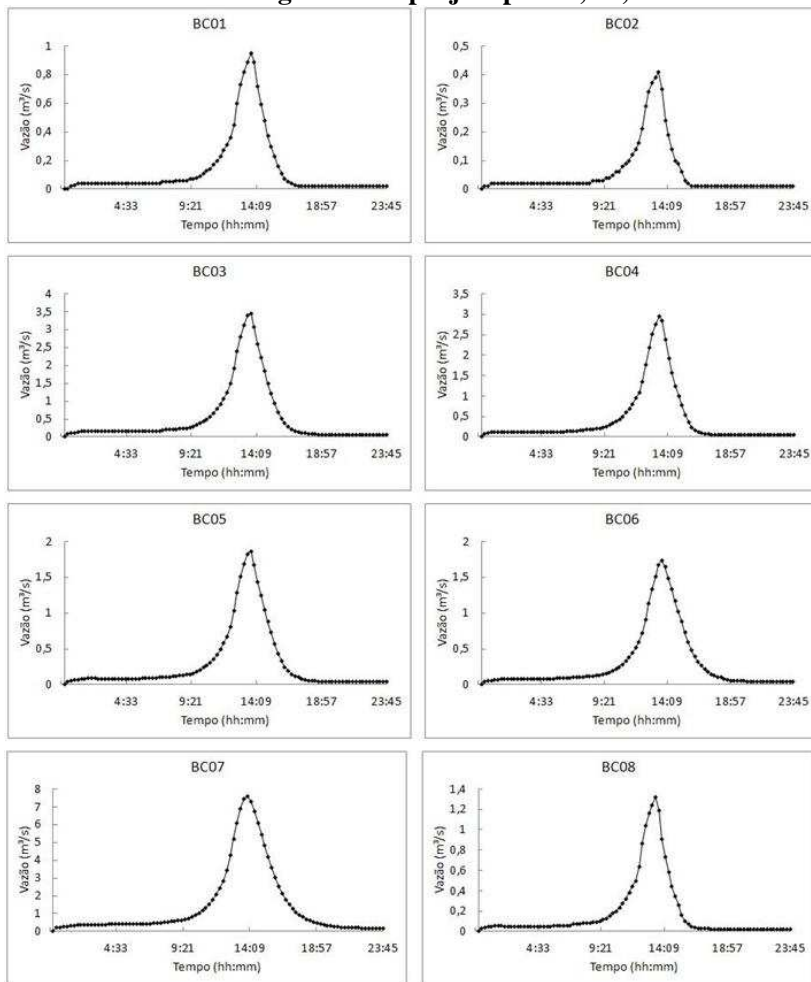


Figura 21 - Hidrogramas das BC01-08 com TR de 5 anos

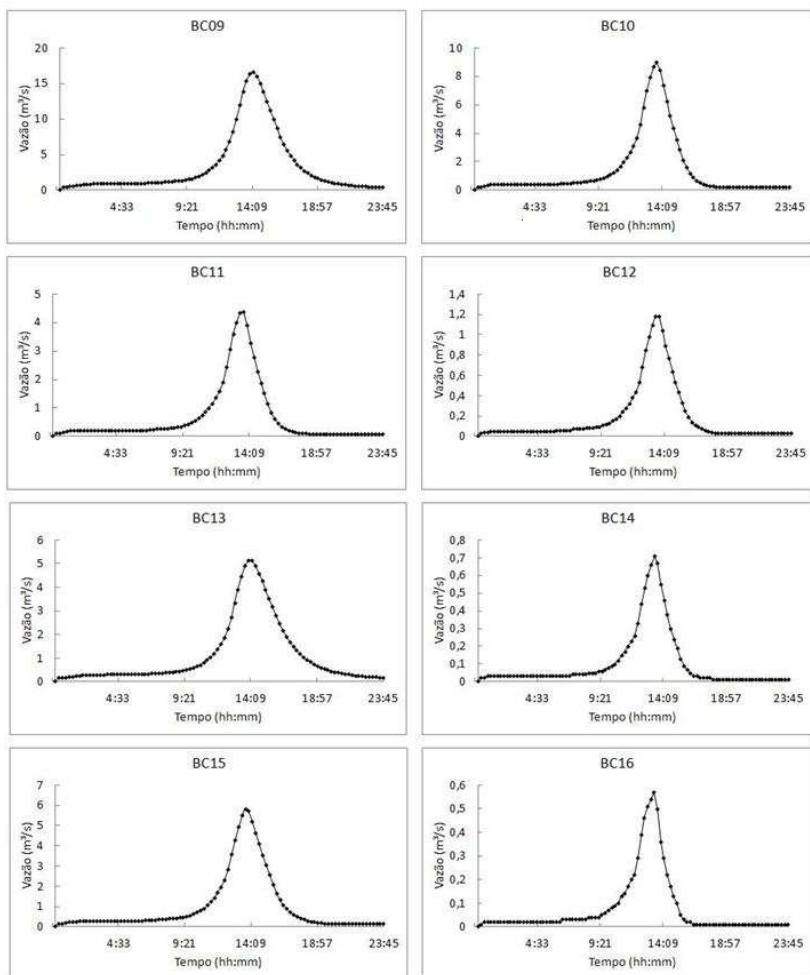


Figura 22 - Hidrogramas das BC09-16 com TR de 5 anos

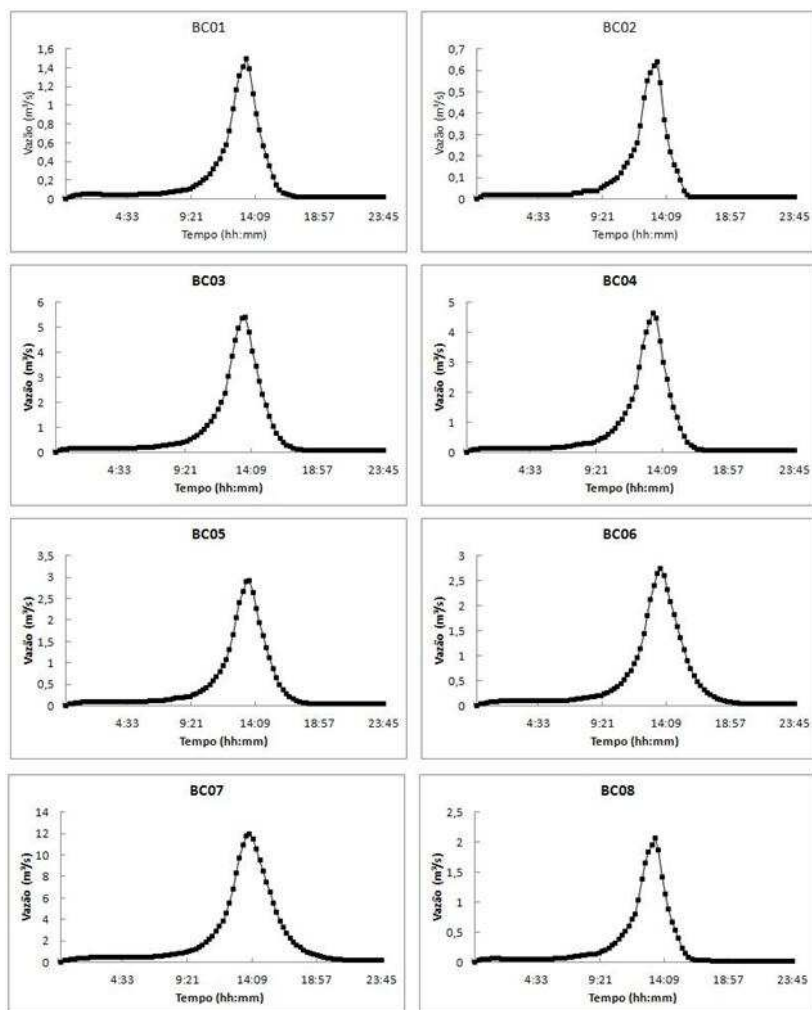


Figura 23 - Hidrogramas das BC01-08 com TR de 20 anos

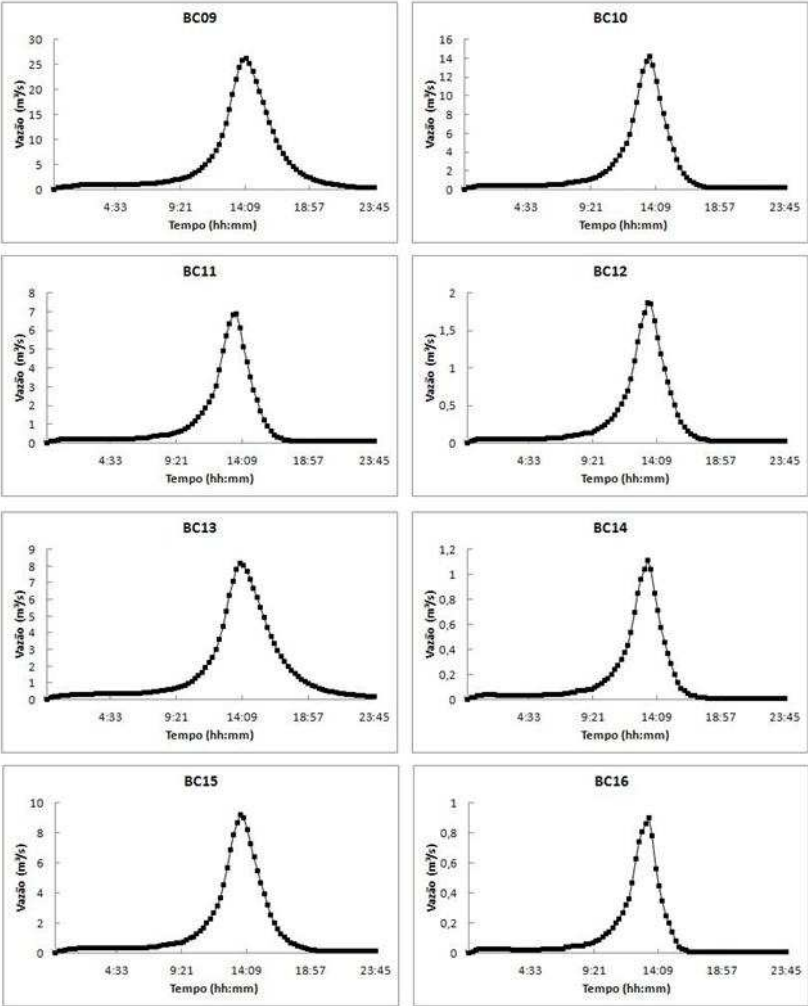


Figura 24 - Hidrogramas das BC09-16 com TR de 20 anos

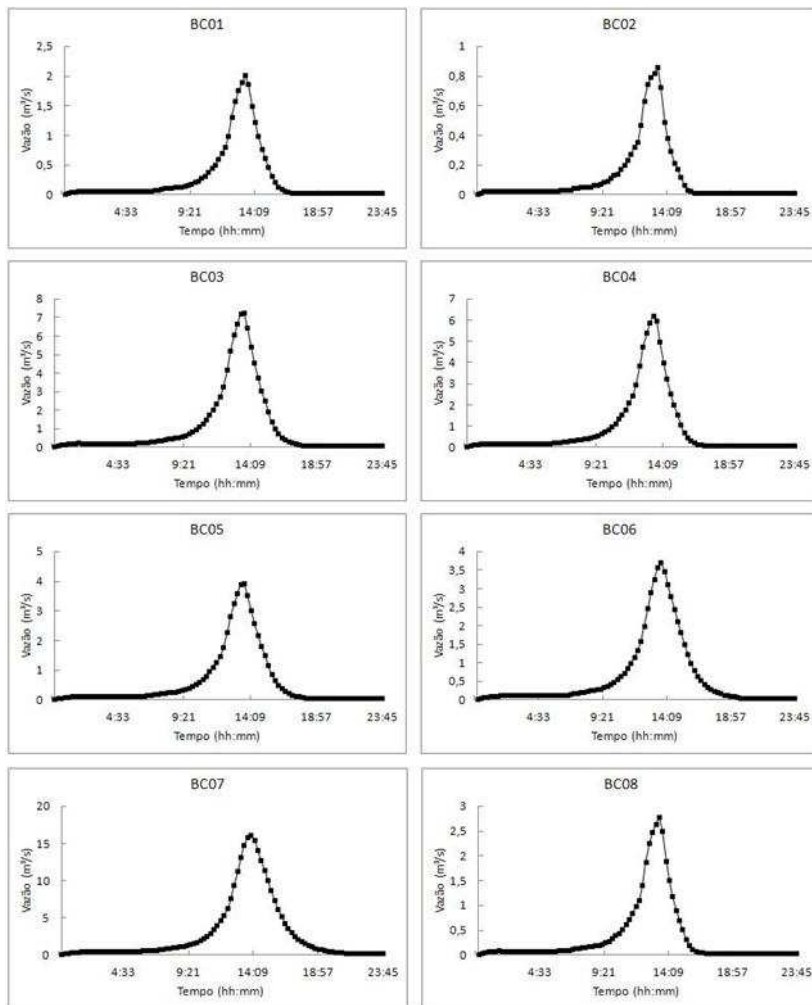


Figura 25 - Hidrogramas das BC01-08 com TR de 50 anos

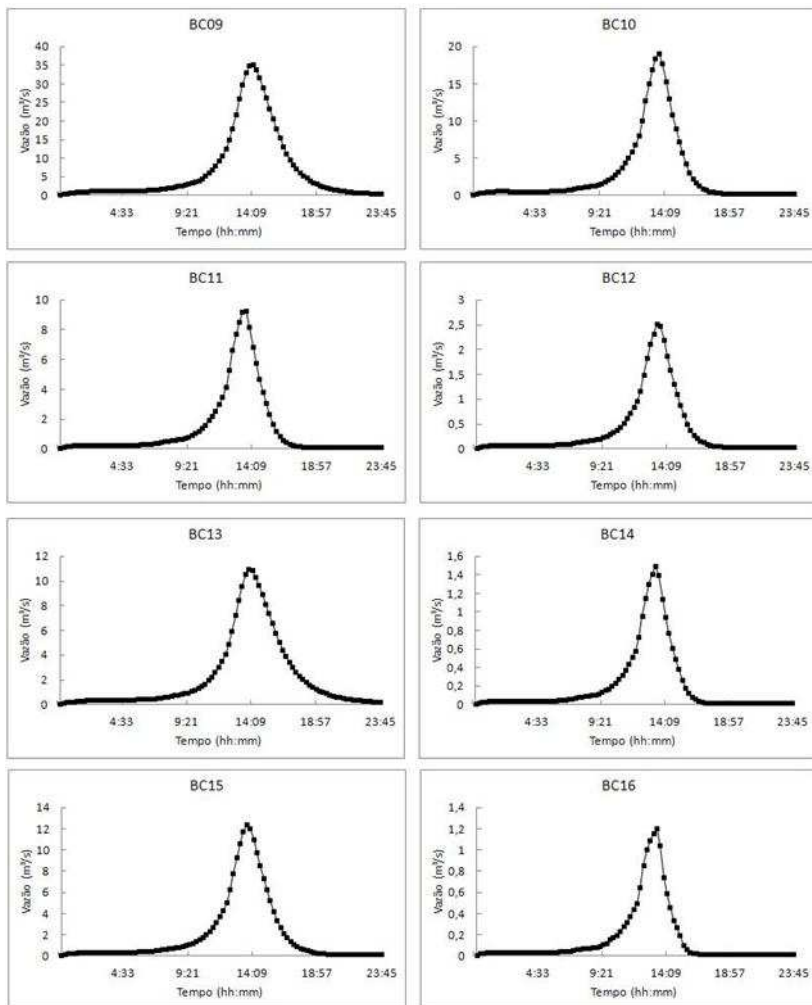


Figura 26 - Hidrogramas das BC09-16 com TR de 50 anos

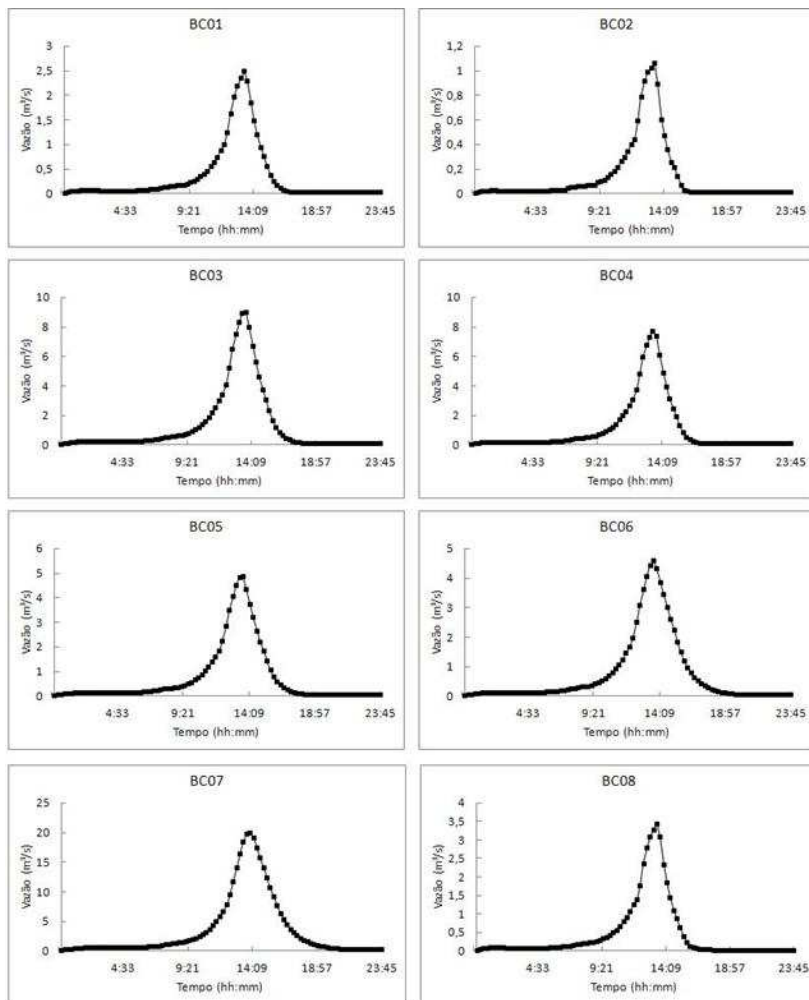


Figura 27 - Hidrogramas das BC01-08 com TR de 100 anos

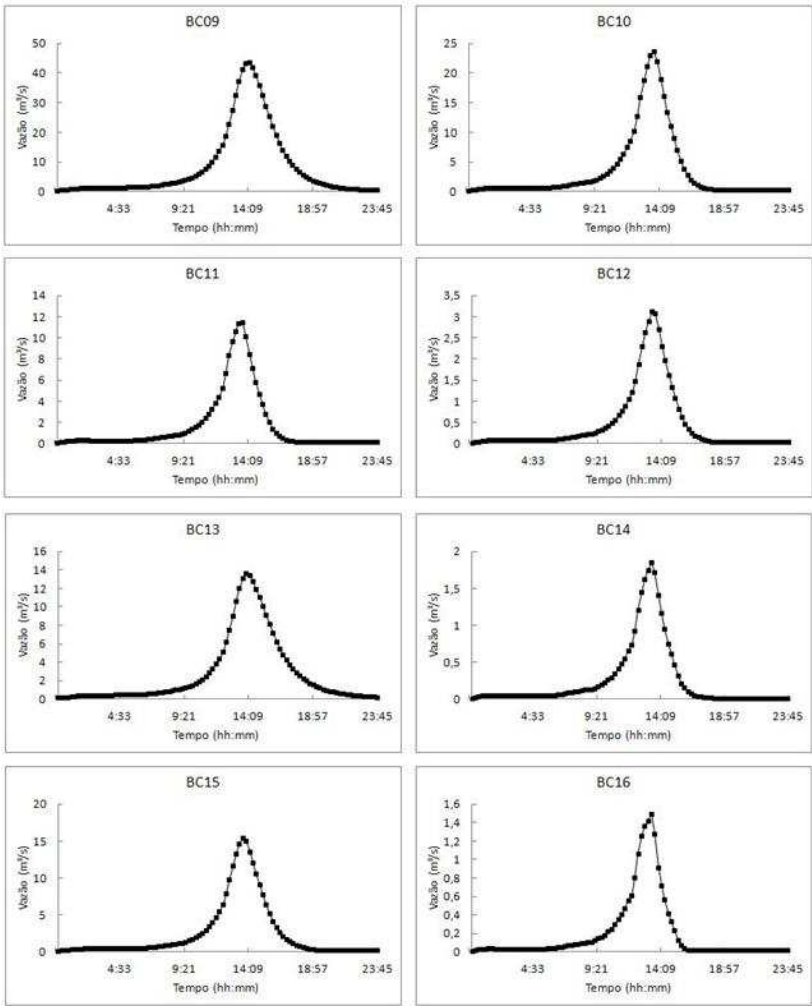


Figura 28 - Hidrogramas das BC09-16 com TR de 100 anos